



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**POROVNÁNÍ PŘESNOSTI VÝROBY OTVORŮ PŘI  
LASEROVÉM DĚLENÍ MATERIÁLŮ NA RŮZNÝCH TYPECH  
CNC DĚLÍCÍCH CENTER**

COMPARISON OF THE OF PRECISION MANUFACTURING OF HOLES DURING LASER CUTTING OF  
MATERIALS ON VARIOUS TYPES OF CNC CUTTING CENTERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

David Petruška

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

**BRNO 2019**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **David Petruška**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Porovnání přesnosti výroby otvorů při laserovém dělení materiálů na různých typech CNC dělicích center**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Srovnání skutečných tvarů otvorů typu kruh, čtverec s ideálním tvarem při jejich výrobě laserovým dělením na CNC řezných centrech s různým typem pohonu os (ozubený hřeben – lineární motor).

### **Cíle bakalářské práce:**

- Osvojit si laserové dělení materiálů.
- Osvojit si problematiku konstrukce CNC dělicích center.
- Osvojit si problematiku měření laserových výpalků.

### **Seznam doporučené literatury:**

BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové technológie. 1. vyd. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

DULEY Walter W. Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-47-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E. Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

PETRUŠKA David: Porovnání přesnosti výroby otvorů při laserovém dělení materiálů na různých typech CNC dělicích center.

---

Práce porovnává přesnost laserových výpalků o rozměrech 90x90 mm s kruhovými a čtyřúhelníkovými otvory, které jsou děleny na dvou CNC dělicích centrech s různým typem pohonu os. Na obou strojích jsou vzorky vyřezány pomocí oxidačního i tavného řezání. Měření proběhlo pomocí posuvného měřítka a pro detailnější a přesnější analýzu na 3D souřadnicovém měřicím stroji s dotykovým systémem. Výsledky měření ukázaly, že vhodnější metoda řezání pro dělení plechu ČSN 11321 DC01 je tavná. Výchyly jmenovitých rozměrů jsou při tavném řezání na obou strojích srovnatelné, a proto by při sériové výrobě těchto výpalků závisela volba stroje na rychlosti výroby, provozních a pořizovacích nákladech.

Klíčová slova: vláknový laser, oxidační a tavné řezání, CNC dělicí centrum, lineární motor

## **ABSTRACT**

PETRUŠKA David: Comparison of the of precision manufacturing of holes during laser cutting of materials on various types of CNC cutting centers

---

The thesis compares the precision of 90x90 mm laser cutouts with circular and quadrangular holes which are divided into two CNC cutting centers with different axle drive types. On both machines, the samples are cut through both oxidative and fusion cutting. Measurement was carried out using a sliding scale and for a more detailed and accurate analysis on a 3D coordinate measuring machine with a touch system. The results of the measurements showed that the more suitable cutting method for sheet metal cutting ČSN 11321 DC01 is melting. Deviations of the nominal dimensions are comparable when cutting on both machines, so the choice of the machine for production speeds, operating and acquisition costs depends on the serial production of these burners.

Keywords: fiber laser, oxidative and fusible cutting, CNC cutting center, linear motor

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PETRUŠKA, David. *Porovnání přesnosti výroby otvorů při laserovém dělení materiálů na různých typech CNC dělicích center*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113134>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 21.5.2019

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval firmě Hiwin s.r.o. za vyřezání vzorků a poskytnutí materiálů k vypracování teoretické části, firmě Aquadem s.r.o. za vyřezání vzorků a následnému přeměření na 3D souřadnicovém dotykovém měřicím stroji, firmě Siemens elektromotory za vyhodnocení rozměrů pomocí 3D měřicího systému a ze všeho nejvíce své rodině za podporu při studiu.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ .....	10
2 TEORIE LASEROVÉ TECHNOLOGIE .....	11
2.1 Laser.....	11
2.1.1 Historie .....	11
2.1.2 Princip .....	12
2.1.3 Vlastnosti .....	13
2.1.4 Základní rozdělení .....	14
2.1.5 Využití v praxi .....	15
2.2 Nejpoužívanější lasery ve strojírenství .....	18
2.2.1 CO2 laser .....	18
2.2.2 Nd:YAG laser .....	21
2.2.3 Diskový laser .....	22
2.2.4 Vláknový laser .....	23
2.2.5 Diodový laser.....	24
2.3 Řezání laserem .....	24
2.3.1 Metody řezání .....	25
2.3.2 Řezné parametry .....	26
2.4 Stroje pro dělení materiálu laserovou technologií .....	28
2.4.1 Pohonné systémy .....	29
2.5 Měření laserových výpalků .....	33
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	34
3.1 Vstupní informace .....	36
3.2 Výsledky měření.....	38
3.3 Zařazení výsledků měření do tolerančních tříd .....	41
4 DISKUZE A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU .....	43
5 ZÁVĚRY .....	44

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh



## ÚVOD [1,2]

V dnešní době existují ve strojírenství různé metody dělení materiálu. Mezi klasické metody patří například třískové obrábění, technologie stříhání nebo výroba otvorů na vysekávacích strojích. Stále populárnější se stávají nekonvekční metody dělení materiálu, do kterých patří dělení kyslíkem, laserem, plazmou a vodním paprskem. Obrovský vzestup má dělení materiálu laserovou technologií, které se používá převážně pro dělení plechů. Kvalita řezu závisí na vstupních parametrech řezného procesu (výkonu laseru, řezné rychlosti, geometrii ohniska, tlaku řezného plynu atd.), zvolené metodě řezání, typu laseru a řezaném materiálu. 2D dělení laserem se pro sériovou výrobu nejčastěji provádí na CNC dělicích centrech portálového typu (viz obr. 1). Jedná se o provedení s tzv. létající optikou, kde se pohybuje řezací hlava a pracovní stůl s obrobkem zůstává nehybný. Přesnost konečného výřezku je závislá na polohování portálového zařízení a na vnitřním pnutí řezaného materiálu, díky kterému se z kruhového otvoru může stát elipsový a z původně vyřezávaného čtverce může vzniknout například kosočtverec. V rozvoji jsou CNC dělicí centra s lineárním pohonem, kde odpadá potřeba posuvového mechanismu, který přetváří rotační pohyb na posuvný (lineární). Otázkou však je, jestli se jedná o výhodnější provedení z hlediska přesnosti výsledných dílců.



Obr. 1 Laserové řezání plechů na CNC dělicích centrech [3]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [4]

Práce pojednává o laserovém dělení, konstrukci CNC dělicích center a měření laserových výpalků. Výsledkem experimentální části je porovnání a vyhodnocení vyřezaných plechových vzorků z hlubokotažné nelegované oceli jakosti ČSN 11321 (DC01), která prošla všemi nutnými zkouškami a kontrolami týkající se kvality oceli. Tloušťka tabule plechu je 2 mm a vzorky s kruhovými, čtvercovými a obdélníkovými otvory (viz obr. 2) mají rozměry 90x90 mm.

Vzorky jsou vyřezané na dvou typech portálových CNC strojů. Jedním z nich je CNC dělicí centrum Bystronic Bysprint Fiber 3015 s 3000W vláknovým laserem včetně automatizace ByTrans od švýcarské firmy Bystronic, u kterého pohon os funguje na principu ozubeného hřebene s pastorkem a druhým typem je CNC dělicí centrum FeiCut FCL 3015/5000 W poháněné lineárním motorem, které produkuje firma Hiwin pocházející z Tchaj-wanu.

Oba stroje využívají moderní vláknový laser, který v současnosti u řezání laserovou technologií nahrazuje CO<sub>2</sub> lasery. Mezi celou řadu výhod patří i nenáročnost na údržbu. Na obou centrech se provedlo dělení plechu tavnou i oxidační metodou, aby bylo více vzorků na porovnání.

Samotné měření vzorků se uskutečnilo pomocí posuvného měřítka a pro přesnější a detailnější analýzu i na 3D měřicím stroji. Zjištěné odchylky z naměřených hodnot vzorků byly dle normy ČSN EN ISO 9013 zařazeny do příslušné toleranční třídy. Samotný operátor ve firmě provádí přeměření pouze posuvným měřítkem, protože pořízení 3D měřicího stroje je velmi nákladné a většina firem si ho nemůže dovolit.



Obr. 2 Vzorek z hlubokotažné nelegované oceli jakosti 11321 (DC 01)

## 2 TEORIE LASEROVÉ TECHNOLOGIE

### 2.1 Laser

#### 2.1.1 Historie [5,6,7,8,9,10]

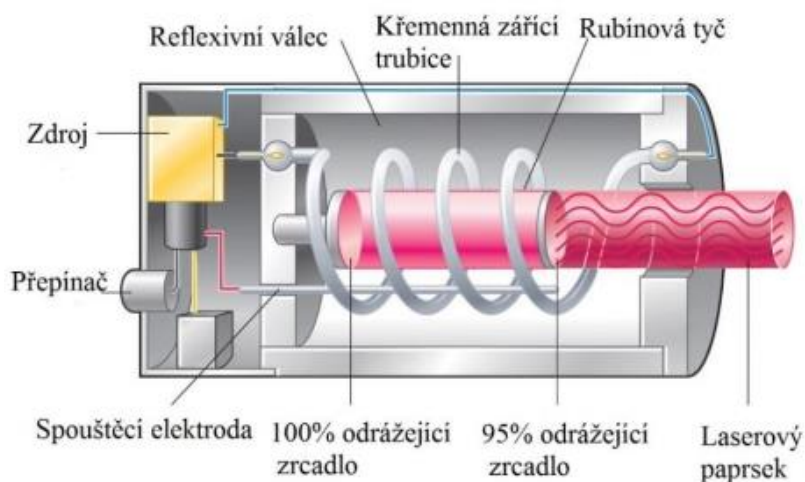
Zkratka „LASER“ pochází z anglické věty „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“, což v překladu znamená „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“.

První zmínky o stimulované emisi pochází z roku 1917. Objevitelem tohoto fyzikálního jevu se stal Albert Einstein, když zjistil, že kromě absorpce a samovolné emise existuje i stimulovaná. Až v roce 1939 přišel ruský fyzik V. A. Fabrikant na uplatnění stimulované emise. Použil ji na zesilování elektromagnetického záření procházejícím prostředím. O dvanáct let později tento významný fyzik spolu s ruskými kolegy M. M. Vudynským a F. A. Butajevovou dosáhl na získání patentu k vytváření aktivního prostředí v plynovém výboji. Nejprve byl tento objev použit v mikrovlnné oblasti.

V roce 1954 v Moskvě na Fyzikálním ústavu akademie věd a na Kolumbijské univerzitě v New Yorku vznikly první kvantové generátory mikrovlnného záření. Podíleli se na tom ruští fyzikové N. G. Basov, A. M. Prochorov a americký fyzik Ch. H. Townes. Tyto generátory nazvaly „Maser“. Jedná se o zkratku z názvu „Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. V češtině možné přeložit jako „zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření“. Základem nového vynálezu byla komora obsahující čpavek, která byla vložena do silného elektrického pole. Potřebná energie ke vzniku stimulované emise byla získána pomocí molekul čpavku. Maser byl používán k zesilování nízkých mikrovlnných signálů a ke generování mikrovln. Měl velmi nízkou úroveň šumu a vysokou stabilitu kmitočtu. Tento vynález se stal také nejpresnějšími hodinami.

Čpavkový maser, ale pořád pracoval pouze s mikrovlnami a ne se stimulovanou emisí světla. O upravení tohoto maseru se pokusil americký fyzik Theodore Maiman. Potřeboval vyřešit tři základní problémy. Zjistit jaké použít aktivní prostředí, aby se projevila stimulovaná emise, jak docílit přejití atomů aktivního prostředí na vyšší energetickou hladinu a zajistit, aby v aktivním prostředí docházelo k zesílení světla pomocí stimulované emise. V roce 1960 Theodore Maiman vše vyřešil a vynalezl první pevnolátkový laser neboli optický maser (viz obr. 3). Jako aktivní prostředí zvolil krystal syntetického rubínu, na buzení atomů na vyšší energetickou hladinu zvolil krátké světelné záblesky pomocí výbojek a k zesílení světla docházelo díky dvěma rovnoběžným zrcadlům. Po rubínovém laseru nastal velký vývoj. Ve stejném roce byl vyroben první vodíkový maser a v roce 1962 už byl sestaven první polovodičový laser.

V Československu byl první maser uveden do provozu v roce 1962 a první laser se představil o rok později. Jednalo se o Československou akademii věd a Vojenský výzkumný ústav v Brně. Na



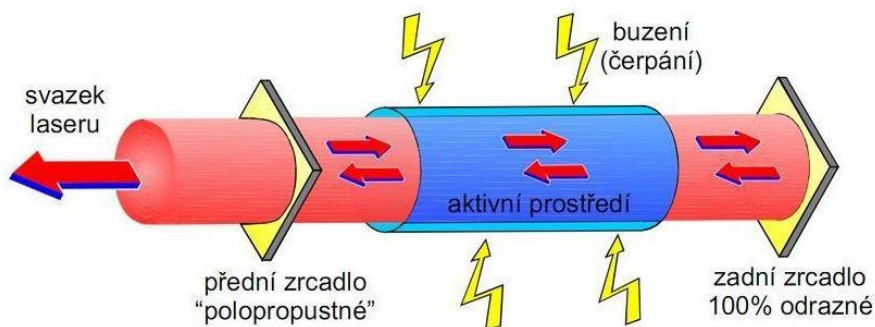
Obr. 3 Rubinový laser (optický maser) [11]



zkonstruování prvního československého plynového laseru se podílel tým Františka Petrů, který byl zaměstnán na Ústavu přístrojové techniky v Brně.

### 2.1.2 Princip [10,12,13,14]

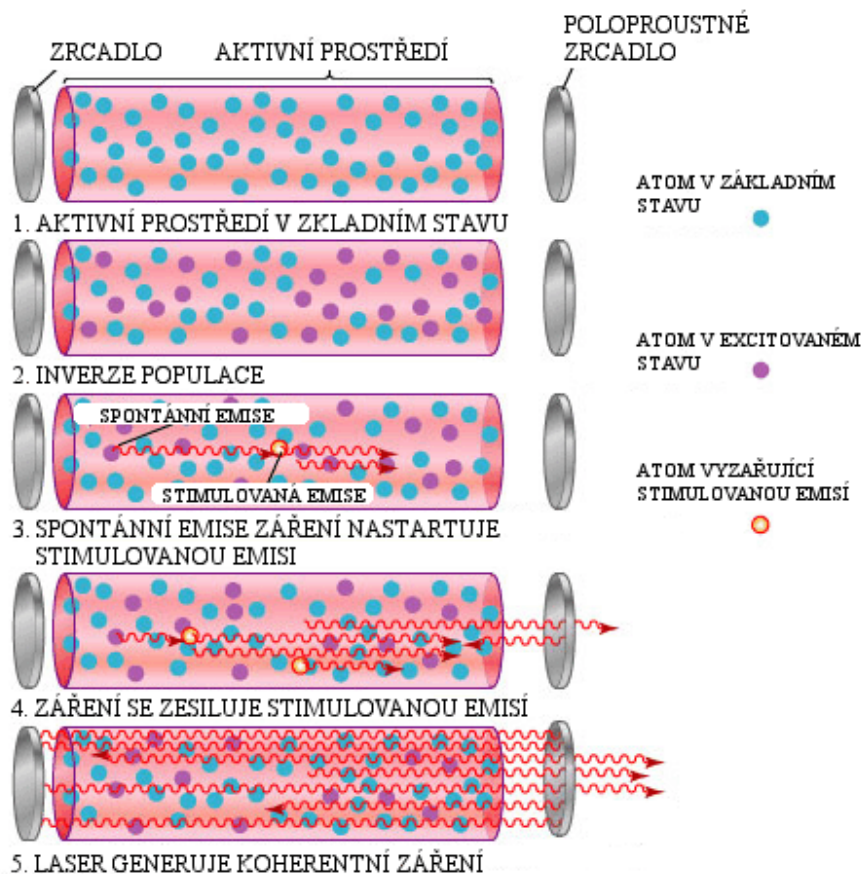
Základem každého laseru je aktivní prostředí, rezonátor a zdroj buzení (čerpání energie, viz obr. 4). Aktivní prostředí obsahuje element, který čerpá energii (opticky, elektricky, chemicky, termomechanicky atd.) Element se nachází buďto v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném stavu s vyšším obsahem energie. Jako element je nejčastěji použit atom, ale může být nahrazen například vibračním stavem molekuly nebo chemickou vazbou. Rezonátor je obvykle tvořen odraznými zrcadly.



Obr. 4 Obecné schéma laseru [12]

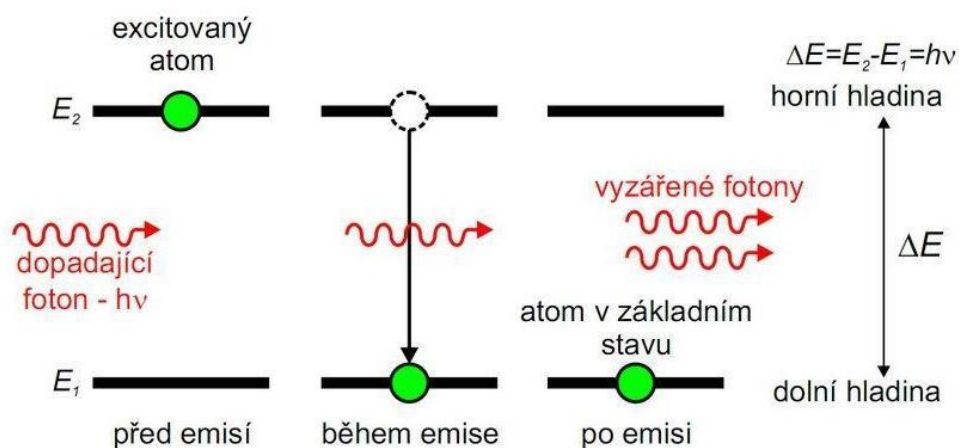
Důležité je si uvědomit, že při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu element vyžáří foton. Pojem foton představuje kvantum elektromagnetického záření. Jedná se o spontánní jev, který se děje sám od sebe. Aktivní prostředí se snaží vždy dostat do co nejnižšího energetického stavu.

Jde o stav termodynamické rovnováhy. Pomocí buzení se tento stav pravidelně porušuje a aktivní prostředí se dostává do excitovaného stavu. V tomto stavu má většina elementů vyšší energetickou hladinu a dojde k tzv. inverzi populace. Po dosažení inverze populace může teprve dojít k přeměně dodané energie aktivního prostředí na laserový svazek pomocí stimulované emise (viz obr. 6). Laserový svazek je tvořen z proudu fotonů. Celý tento proces je tzv. lavinovitý efekt,



Obr. 5 Vznik laserového svazku (proudu fotonů) [12]

kdy fotony dopadající na excitovaný atom způsobí jeho energetický přechod z horní na dolní hladinu. Současně se uskuteční emise dalšího fotonu. Díky putování fotonů rezonátorem, který tvoří odrazná zrcadla, dojde k obrovskému nárůstu fotonů a energie v podobě laserového svazku se uvolní přes polopropustné zrcadlo (viz obr. 5).

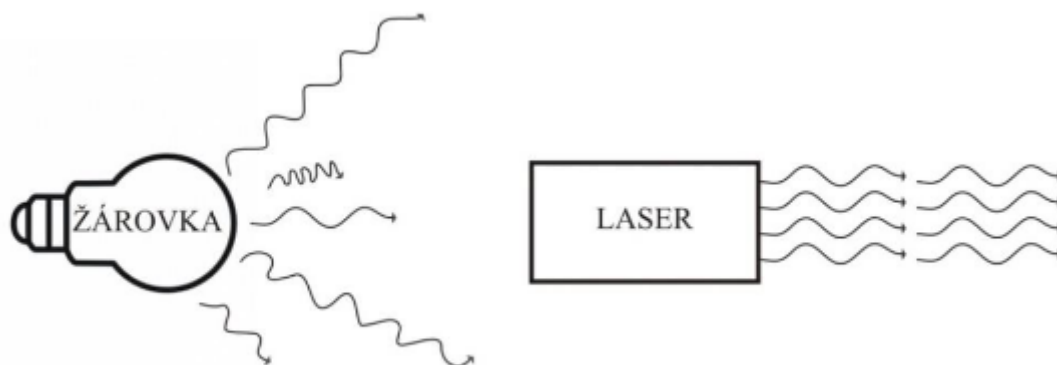


Obr. 6 Proces stimulované emise [12]

### 2.1.3 Vlastnosti [10,12,15]

Díky výjimečným vlastnostem laseru je spousta rozdílů mezi laserovým zářením a například žárovkou (viz obr. 7). Mezi nejzákladnější vlastnosti patří:

- **Usměrňenost** – Oproti tradičnímu zdroji světelného záření se laserový paprsek nešíří chaoticky. Paprsek je téměř paralelní, a proto má nízkou rozbíhavost a divergenci. Při fokusaci paprsku na malou plochu se dosáhne obrovského výkonu a lze obrábět materiál.
- **Koherentnost** – Koherentní neboli souvislý paprsek znamená, že generované fotony jsou v časové i prostorové fázi. Tzn., že všechny světelné vlny mají stejnou frekvenci a kmitají v taktu. Díky této vlastnosti vzniká soudržný paprsek.
- **Monochromaticnost** – Dá se říci i „jednobarevnost“. Všechny generované fotony mají stejnou frekvenci (vlnovou délku). Hodnoty vlnové délky závisí na druhu použitého aktivního prostředí. Rozdíl mezi frekvencí kmitání viditelného světla a laseru je patrný. U viditelného světla se hodnoty pohybují řádově okolo  $10^{15}$  Hz, kdežto u laseru něco mezi  $10^8$  a  $10^9$  Hz. Na redukování kolísání frekvence o několik řádů lze dosáhnout stabilizací.



Obr. 7 Porovnání laserového záření a žárovky [15]

### 2.1.4 Základní rozdělení [5,10,12,13,16,17]

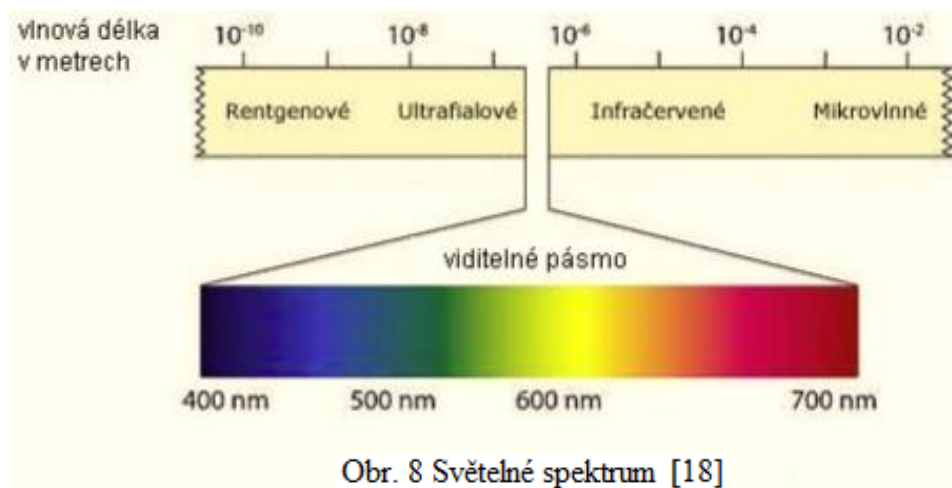
V dnešní době existuje velké množství typů laserů a vývoj jde stále dopředu. Lasery se dají dělit podle mnoha kritérií.

a) Podle druhu aktivního prostředí:

- pevnolátkové - tyčové
  - diskové
  - vláknové
- polovodičové
- plynové
- kapalinové
- plazmatické

b) Podle vysílaných vlnových délek (viz obr. 8):

- infračervené
- viditelného pásma
- ultrafialové
- rentgenové



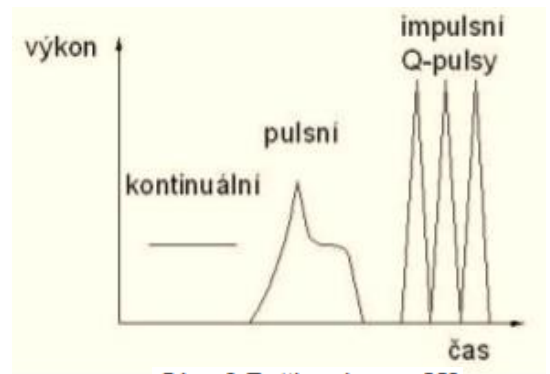
c) Podle zúčastněných energetických hladin na kvantovém přechodu:

- molekulární - rotační
  - rotačně-vibrační
  - vibrační
- elektronové
- jaderné

d) Podle časového režimu provozu (viz obr. 9):

- impulsní (Qs, oblast vědy)
- pulsní (Pw) - řádově milisekundy (svařování)
  - řádově mikrosekundy až nanosekundy (gravírování)
  - řádově pikosekundy až femtosekundy (mikroobrábění)
- kontinuální (Cw) - dle výkonu - malé výkony (až 103 W)
  - velké výkony (103 až 105 W)
- dle typu pracovní hlavy
  - pevná hlava - pohyblivý stůl
  - pohyblivý paprsek (skenovací hlava, využití: „remote welding“, gravírování, řezání)
- pohyblivá hlava

- e) Podle délky generovaného pulsu:
- s dlouhými pulsy
  - s krátkými pulsy
  - s velmi krátkými pulsy - pikosekundové
  - femtosekundové
- f) Podle typu buzení:
- opticky
  - elektrickým výbojem
  - elektronovým svazkem
  - tepelnými změnami
  - chemicky
  - rekombinací
  - injekcí nosičů



Obr. 9 Režimy laseru [5]

Nejčastěji se využívá rozdělení dle typu aktivního prostředí.

### 2.1.5 Využití v praxi

V dnešní době se lasery využívají čím dál častěji. Zasahují takřka do každé vědní disciplíny. Aplikují se hlavně: [16,19,20,21,22,23]

- a) v průmyslu - řezání
- svařování a pájení
  - gravírování a značení
  - vrtání
  - mikroobrábění
  - povrchové úpravy
  - kalení
  - 3D tisk (SLA, SLS, DMLS)
  - dekorace skla
  - zaměřování a měření vzdáleností
- b) v medicíně - oční lékařství
- dermatologie
  - chirurgie
  - onkologie

- c) v holografii - hologramy

A v dalších odvětvích, například v astronomii, geodézii, geofyzice, ekologii, metrologii, válečné technice, při kopírování a tisknutí atd. [16,24]

V oboru strojírenství má využití laserů spoustu výhod. Mezi ně mimo jiné patří: [16,19]

- možnost opracování bez kontaktu s výrobkem
- obrábění bez vynaložení síly
- malá tepelně ovlivněná oblast
- velmi malá řezná spára
- vysoká preciznost procesu
- vysoká rychlost procesu
- možnost vytvořit jakýkoliv tvar bez výměny nástroje
- tichý a čistý provoz
- pomocí optické soustavy lze laser zavést na několik pracovišť z jediného zdroje
- možnost vysokorychlostního obrábění i velmi těžkoobrobitelných materiálů
- možnost řezání všemi směry
- vysoká hustota a koncentrace energie (snadná regulace výkonu a ovládání)
- není nutná údržba klasických nástrojů (ušetření času)
- lze zařadit do automatizovaných pružných výrobních systémů

- svařování i těžko dostupných míst
- nízká tepelná pnutí a deformace uvnitř materiálu
- minimum dokončovacích operací

Samozřejmě se najdou i nevýhody. Výhod má laser podstatně více, ale nesmíme zapomenout na negativa této technologie: [16,19]

- vyšší pořizovací cena
- nižší účinnost vůči příkonu zařízení
- přísná bezpečnostní opatření

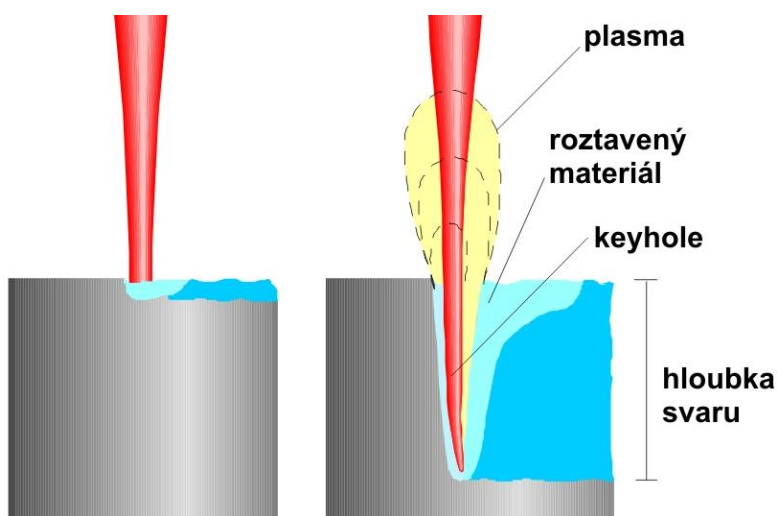
Ve strojírenství se využívá laser hlavně při řezání (viz podkapitola 2.3), svařování, povrchových úpravách, gravírování a značení. [16,19]

#### • Svařování [1,6,25,26,27,28]

Ke svařování dojde, zamíříme-li fokusovaným paprskem na styk dvou ploch. Laser se liší od elektronového svazku tím, že nevyžaduje přítomnost vakua. Svar vytvořený pomocí laseru má vysokou kvalitu a pevnost. Výkon se u laserového svařování pohybuje v rozmezí 0,5 až 9 kW. Oproti laserovému vrtání a řezání se při svařování vyžaduje menší intenzita svazku, naopak delší doba trvání impulsu. Pro tuto technologii se spíše využívají pevnolátkové lasery, avšak výjimečně se praktikuje užití i CO<sub>2</sub> laserů.

Existují dva druhy laserového svařování (viz obr. 10):

- Kondukční svařování - Provádí se pomocí krátkých impulsů pevnolátkových laserů. Jedná se o velice kvalitní malé svary, které se využívají hlavně v průmyslu a lékařství. Materiál je laserovým paprskem roztavován pouze na povrchu a svar je tedy hluboký jen několik desetin milimetru.
- Hluboké svařování „key hole“ – Právě u této technologie se využívá CO<sub>2</sub> laser, který pracují v kontinuálním režimu. Dojde-li ke správnému zkombinování parametrů (výkon laseru, rychlost svařování atd.), vytvoří se v materiálu jev, který se nazývá „efekt klíčové dírky“. Materiál se přehřeje, z místa svaru se odpaří a tlak, který vytvoří vzniklé plyny, vytvoří v materiálu hlubokou a úzkou dutinu. Ta je tvořena vrstvou taveniny, která uzavírá svarovou lázeň. Za dutinou dochází k rychlé krystalizaci roztaveného kovu a vzniká úzký a hluboký svarový spoj. Výhodou je svařování větší šířky materiálů, aniž by byla potřeba přídavného materiálu. Při svařování se v průběhu do oblasti svaru zavádí asistenční plyn, aby zabránil k oxidaci a pórovitosti v místě svaru. Vzniká tedy kvalitní a celistvý svar bez cizích příměsí. V praxi na tuto technologii narazíme při výrobě převodovek, profilů nebo tlustostěnných trubek.



Obr. 10 Grafické porovnání metod svařování laserem [26]

#### • Povrchové úpravy (čištění povrchu) [29,30,31]

V dnešní době se vymýšlí stále nové a nové technologie pro povrchové úpravy materiálů. Základem vývoje jsou dva hlavní důvody. Jednak se jedná o ekonomickou část a jednak také o ochranu životního prostředí. Místo rozpouštědel a mechanických metod (kartáčování,



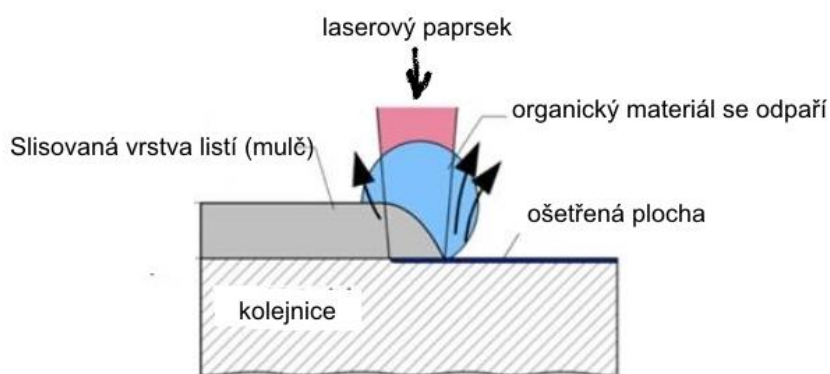
tryskání atd.) se začalo používat laserové čištění. Nejčastěji se používají pulsní lasery. Tato metoda zatím není tak masově rozšířená a nejde tedy o ekonomicky výhodnější technologii, ale nedochází k poškození čištěného povrchu a tedy i k nepříznivému ovlivnění životního prostředí. K čištění nejsou nutné další chemikálie a nevznikají žádné kapalně či plynné odpady. Nutné je nastavení správných parametrů, aby došlo pouze k odpaření nečistot a ne k poškození materiálu.

Při znečištění adsorbovanými organickými nečistotami (olej, tuk atd.) laserové záření přímo nebo nepřímo přeruší vazby mezi adsorbátem a povrchem a dojde k následnému oddělení nečistot od povrchu materiálu. Výběr správné vlnové délky a energie je pro tuto technologii zásadní. Po vhodném zvolení dojde k absorpci světla povrchem materiálu až po přerušení vazeb mezi nečistotami a povrchem. Po absorpci světla dojde k zahřátí materiálu a zvýšení lokální teploty vede k odpuzení a oddělení adsorbovaných částic. Při ideálních parametrech je odstraněno až 90 % organických nečistot a 75 % železných částic ze znečištěné oceli.

Při čištění povrchu materiálu od barev a různých polymerů dochází opět k odstranění vrstvy nečistot díky energii dodané laserem. Nejčastěji se pro tento typ znečištění používá tzv. TEA-CO<sub>2</sub> laser. Při vhodně zvolené vlnové délce dojde k absorpci světla vazbami v organických látkách. Až se podaří odstranit nátěr, dojde k odrazu dopadajícího světla od povrchu kovu a nedojde-li tak k poškození povrchu materiálu.

Jestliže dojde ke znečištění materiálu vrstvou oxidu, závisí na optických vlastnostech materiálu. Buď se jedná o silně absorbující vrstvu oxidu, nebo o slabě absorbující vrstvu oxidu. V prvním případě dojde k lokálnímu zahřátí a k postupné tvorbě trhlin. Po čtvrtém pulzu díky tepelné roztažnosti nastane částečné odpuzování oddělených fragmentů od povrchu materiálu. V závislosti na mnoha parametrech dojde k následnému odtržení fragmentů od kovu. Ve druhém případě hraje vrstva kovu roli média a může tam tedy také dojít ke zvýšení amplitudy akustické vlny.

V praxi se tato metoda používá například při restaurování uměleckých děl, při výrobě skla a gumových výrobků, v mikroelektronice, při odstraňování nátěrů z letadel a při odstraňování spadlého listí z kolejnic (viz obr. 11).



Obr. 11 Princip čištění kolejnic [32]

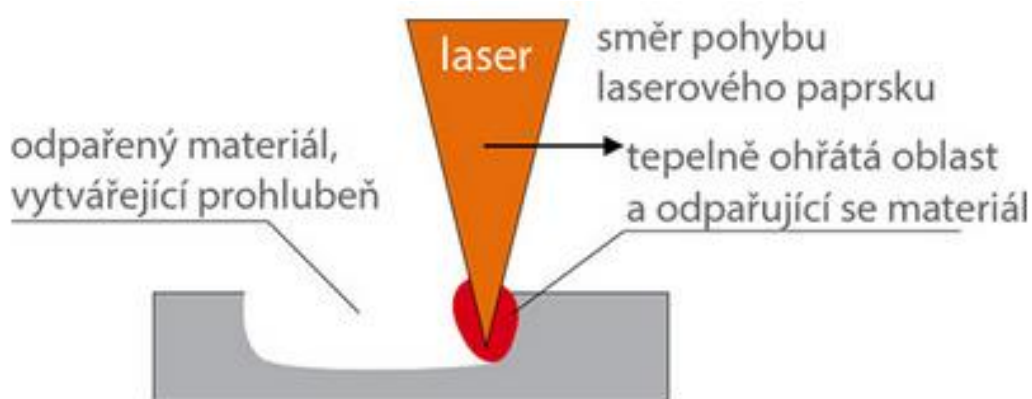
- **Gravírování a značení [21,28,33]**

Laserové gravírování a značení je už také hodně populární. Díky laserovému paprsku se na povrchu materiálu vytvoří velmi přesný a mechanicky odolný popis. K dosažení trvanlivosti není potřeba zásahu žádných barev nebo chemických přísad. Pro tuto technologii se používají plynné CO<sub>2</sub> lasery i pevnolátkové Nd:YAG lasery. Záleží na materiálu značeného povrchu a na hloubce značení. CO<sub>2</sub> lasery se používají pro práci s organickým materiálem. Jedná se například o gumu, papír, dřevo a sklo. Obvykle se pomocí CO<sub>2</sub> laseru odstraňují pouze tenké vrstvy nebo barvy z povrchu organického materiálu. Kdežto Nd:YAG lasery jsou vhodné pro gravírování do větších hloubek a aplikují se například na kovy, plasty nebo keramiky. Najednou se dá materiál gravírovat do hloubky v rozmezí 0,0125 až 0,15 mm. Při opakování procesu na jednom místě se dosahuje hloubek v řádu milimetrů.

Existují dva principy použití laserové technologie pro gravírování:

- a) tavení a odpaření materiálu (viz obr. 12) - Využití u značení a gravírování kovů.
- b) zuhelnatění povrchu - Používá se u popisování plastů, kde se dá při správné kombinaci parametrů měnit sytost a zabarvení materiálu.

Proces je řízen pomocí počítače. Po zařazení laserové technologie do gravírování a značení nastalo spoustu výhod. Mezi ně například patří rychlost, flexibilita změny označení, možnost změny motivu u každého výrobku a možnost značení grafických motivů a alfanumerických znaků. Laserové značení a gravírování má široké uplatnění. Používá se například při gravírování vstřikovacích a lisovacích forem, vyjiskřovacích měděných i uhlíkových elektrod, vyhazovačů, datumovek, razníků a razidel, značení dílů s povrchovou úpravou, značení leštěných a broušených dílů, polotovarů, finálních výrobků a součástek, nástrojů, kalibrů měřidel, plastových výlisků a popisu stupnic a čísel měřidel.



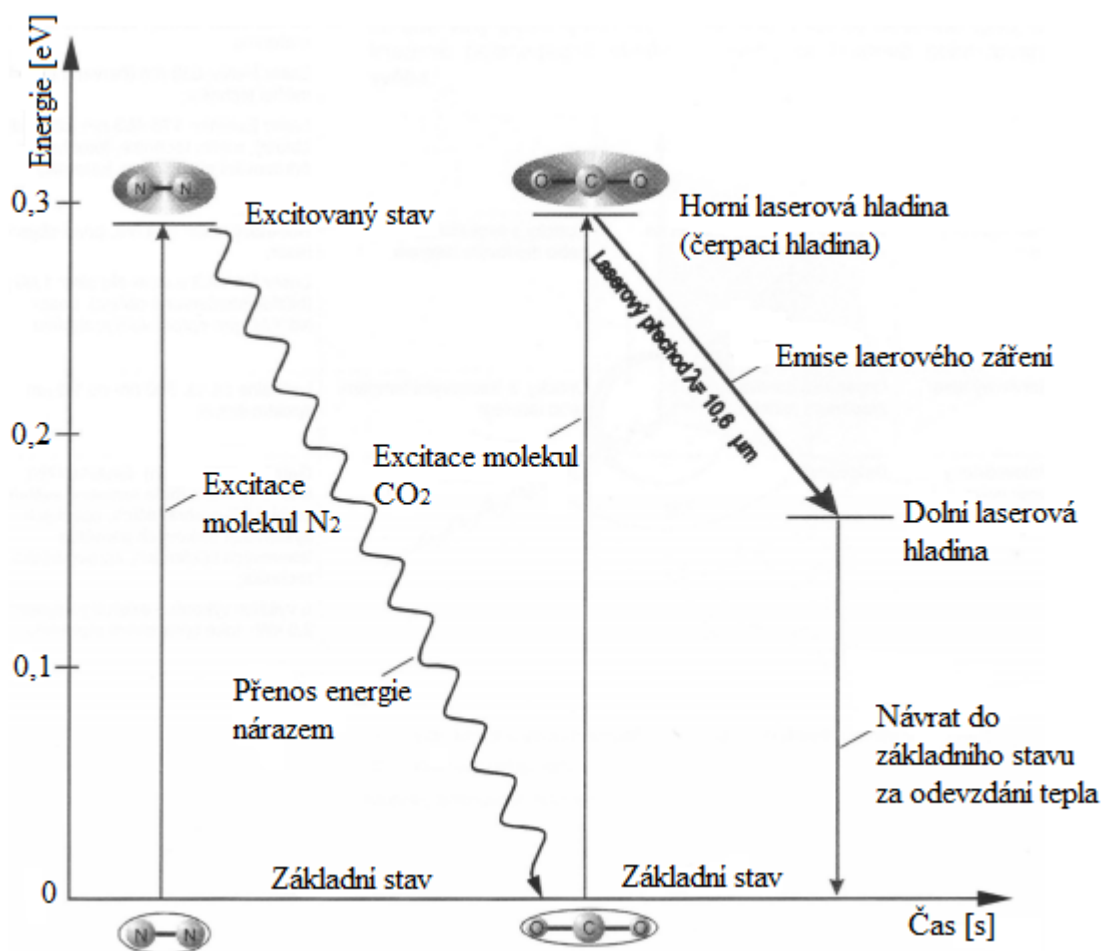
Obr. 12 Princip laserového gravírování a značení kovů [33]

## 2.2 Nejpoužívanější lasery ve strojírenství

### 2.2.1 CO<sub>2</sub> laser [4,10,13,16,17,27,34,35,36,37]

CO<sub>2</sub> lasery patří mezi plynové lasery. Jejich aktivní prostředí je tvořeno molekulami oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), dusíku (N<sub>2</sub>) a hélia (He). Nejvíce obsahuje hélia a to cca 80 %, dále 15 % dusíku a 5 % oxidu uhličitého. Ke stimulované emisi ovšem dochází pouze v molekulách oxidu uhličitého. Směs plynů je umístěna v trubici ze speciálního skla, kde za nízkého tlaku nepřetržitě proudí.

Vznik laserového paprsku u CO<sub>2</sub> laseru je rozdělen do čtyř etap (viz obr. 13). Nejprve dojde k vybuzení molekul dusíku do excitovaného stavu. V tomto stavu molekuly setrvávají déle než 0,1 sekundy a stávají se tzv. zásobníkem energie. Ve druhé etapě dochází po srážkách molekul dusíku v excitovaném stavu s molekulami oxidu uhličitého v základním stavu k předání energie a molekuly CO<sub>2</sub> se vybudí na horní energetickou hladinu. Molekuly dusíku se naopak vrátí do základního stavu. Poté při vlnové délce 10,6  $\mu\text{m}$  nastane emise laserového záření a molekuly CO<sub>2</sub> přejdou z horní na dolní laserovou hladinu. Při uvolňování tepla se pak molekuly CO<sub>2</sub> dostanou nezářivým přechodem do základního stavu. Teplo je díky velké tepelné vodivosti hélia odváděno do okolí.



Obr. 13 Princip vzniku záření u CO<sub>2</sub> laserů [27]

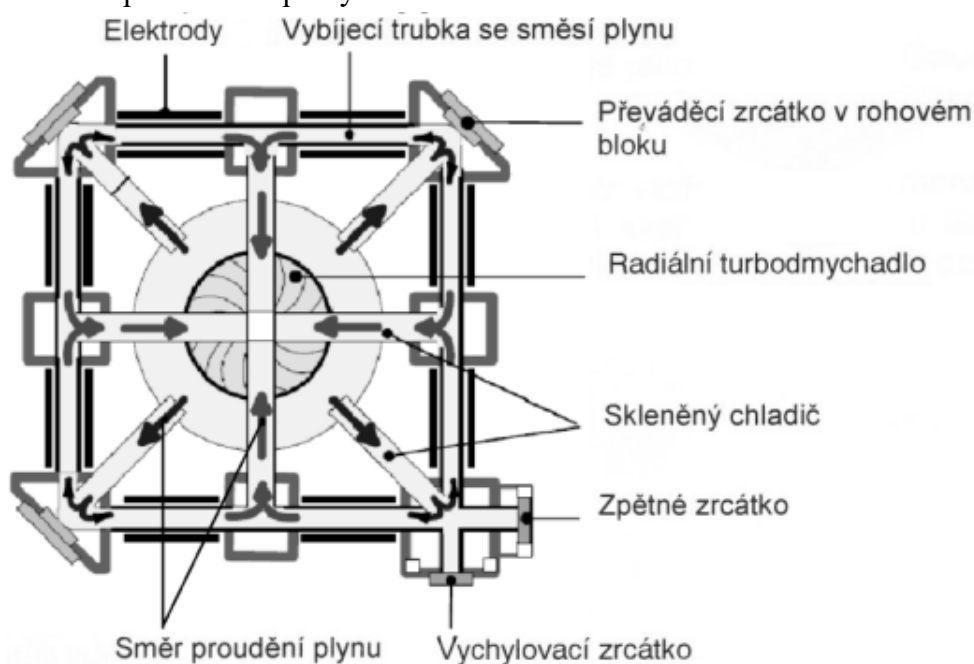
U CO<sub>2</sub> laserů se využívají dva typy buzení. Prvním typem je radiofrekvenční buzení (RF) a druhým buzení elektrickým výbojem (DC - „direct current“). Radiofrekvenční buzení je díky možnosti umístění elektrod mimo rezonátor výhodnější. Od toho se odvíjí nižší spotřeba laserového plynu, minimální opotřebení elektrod a menší nároky na údržbu. Vydávaná vlnová délka záření CO<sub>2</sub> laserů je 10,6 μm a tato hodnota zasahuje daleko do oblasti infračerveného záření. Díky tomu nelze pro vedení paprsku použít optické vlákno a musí se používat speciální optika, která má naopak větší nároky na údržbu. Optika se nesmí skládat ze skleněných zrcadel, a proto se využívá se refrakční (ZnSe, Ge, GaAs) nebo reflexní optika (Si/Cu s Au). CO<sub>2</sub> lasery se používají v kontinuálním i pulsním režimu a díky své vlnové délce se dají při dobré absorpci aplikovat i na organické (kůže, papír, dřevo atd.) či polymerní materiály. Účinnost se pohybuje v rozmezí 5 až 10 % a výkon dosahuje hodnot až 20 kW. CO<sub>2</sub> lasery jsou velmi rozměrné a dodávání chladicí kapaliny a pracovní plyné směsi je velmi finančně náročné. Plynou směs je také potřeba chladit. Používá se buďto chlazení proudící vodou, která je aplikována na povrch rezonátoru, nebo přes tepelný výměník.

Dle tvaru rezonátoru a charakteristiky proudění laserového plynu se rozlišují čtyři druhy CO<sub>2</sub> laserů:

- **CO<sub>2</sub> laser s pomalým podélným prouděním** - Jedná se o nejstarší typ CO<sub>2</sub> laseru. Výboj má totožný směr s osou trubice a díky němu je dodávána energie aktivnímu prostředí. Dosahovaný výkon je přibližně 50 W na metr délky výbojové trubice rezonátoru. Celkový výkon má hodnoty až 1000 W a hlavní omezení je z hlediska

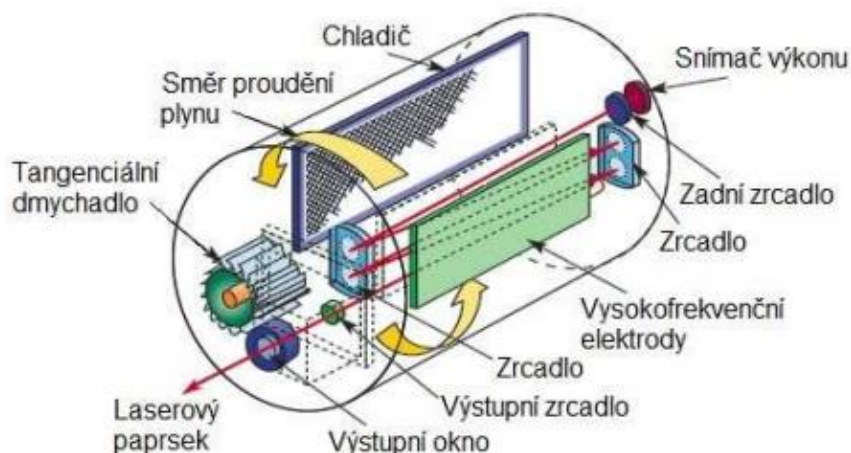
možností chlazení. Tento typ CO<sub>2</sub> laseru pracuje v kontinuálním i pulsním režimu. Výhodou je vysoká kvalita výstupního laserového paprsku a vyznačuje se hladkými a kvalitními řezy.

- **CO<sub>2</sub> laser s rychlým podélným prouděním** (viz obr. 14) - Díky rychlému proudění plynu je schopen dosahovat výkonu až 1kW na metr délky výbojové trubice. Plyn zde setrvává pouze krátkou dobu ve vybíjecí trase, a proto je chlazení prováděno mimo dutinu rezonátoru. Celkový výkon je v tomto případě až 20 kW. Využití je opět v kontinuálním i pulsním režimu. Kvalita vycházejícího laserové svazku je v poměrně dobré kvalitě, a proto se tento typ využívá převážně pro řezání. Výjimečně pro svařování a povrchové úpravy.



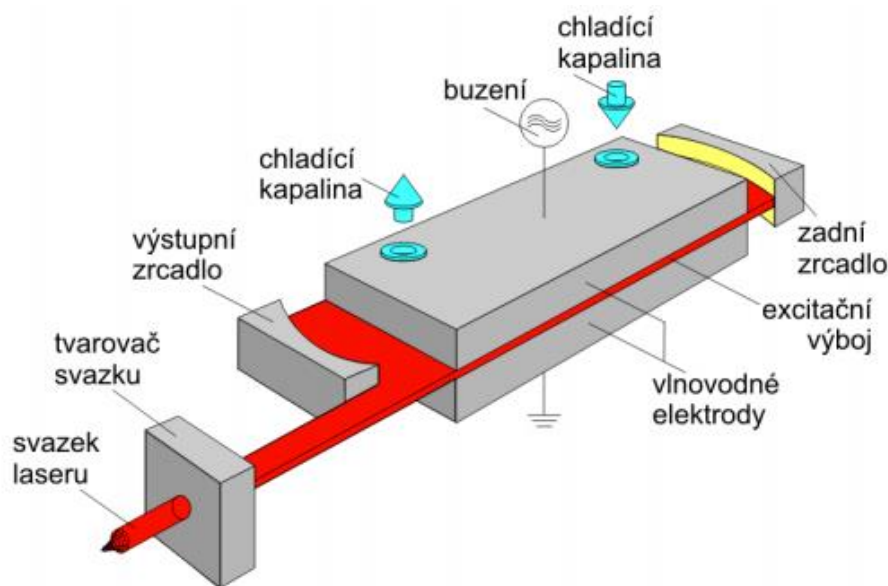
Obr. 14 Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru s rychlým podélným prouděním [27]

- **CO<sub>2</sub> laser s příčným prouděním** (viz obr. 15) - Rozdíl u tohoto provedení CO<sub>2</sub> laseru je ten, že proudící budící výboj, proudění a laserový paprsek působí ve třech různých směrech. Dosahovaný výkon na metr délky výbojové trubice i celkový výkon je stejný jako v předchozím typu. Tyto lasery se ale používají pouze v kontinuálním režimu a kvůli horší kvalitě laserového paprsku se využívají nejčastěji pro svařování a tepelné zpracování.



Obr. 15 Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru s příčným prouděním [34]

- **Slab laser** (viz obr. 16) - Jedná se o moderní typ CO<sub>2</sub> laseru. Laser je pojmenován podle tvaru rezonátoru, kde je aktivní prostředí uzavřeno mezi dvěma deskami. Desky představují paralelní vysokofrekvenční elektrody. Slab laser je difuzně chlazený a dosahuje výkonu až 8 kW. Je specifický vysokou spolehlivostí, nízkou spotřebou laserového plynu, kompaktními rozměry a vysokou kvalitou výstupního laserového paprsku. V praxi se využívají při technologii svařování s velkou hloubkou průvaru a při výkonném řezání.

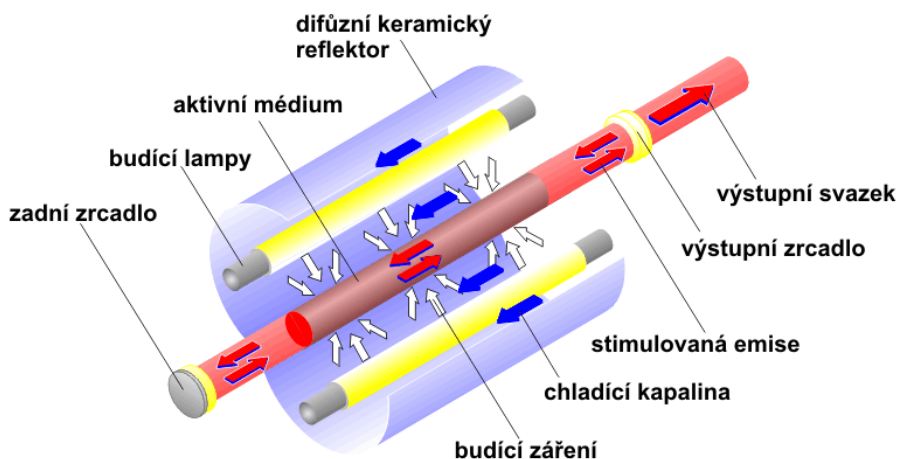


Obr. 16 Konstrukce Slab laseru [4]

### 2.2.2 Nd:YAG laser [4,10,13,16,17,35,36,37,38]

Jedná se o typ jednoho z nejstarších pevnolátkových tyčových laserů. Název je odvozen ze složení aktivního prostředí laseru. Aktivní prostředí tvoří izotropní krystal yttrium aluminium granátu ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ), který je dopovaný ionty neodymu ( $\text{Nd}^{3+}$ ). Nd:YAG lasery pracují v kontinuálním i pulsním režimu, výkonnost se pohybuje mezi 2 a 3 % a maximální výkon může být až 6 kW. Vlnová délka laserového záření Nd:YAG laseru je 1,064 $\mu\text{m}$ , a proto se může pro vedení laserového svazku použít flexibilní optické vlákno. Používá se buzení výbojkami na bázi kryptonu (LPSS - „lamp pumped solid state“) nebo laserovými diodami (DPSS - „diode pumped solid state“).

U prvního typu buzení (viz obr. 17) se výbojky (lampy) stále ohřívají, a proto musí být i s krystalem chlazeny deionizovanou vodou. Výbojky jsou uzavřeny v dutině rezonátoru, která je zkonstruována tak, aby co nejvíce světla bylo odraženo zpátky

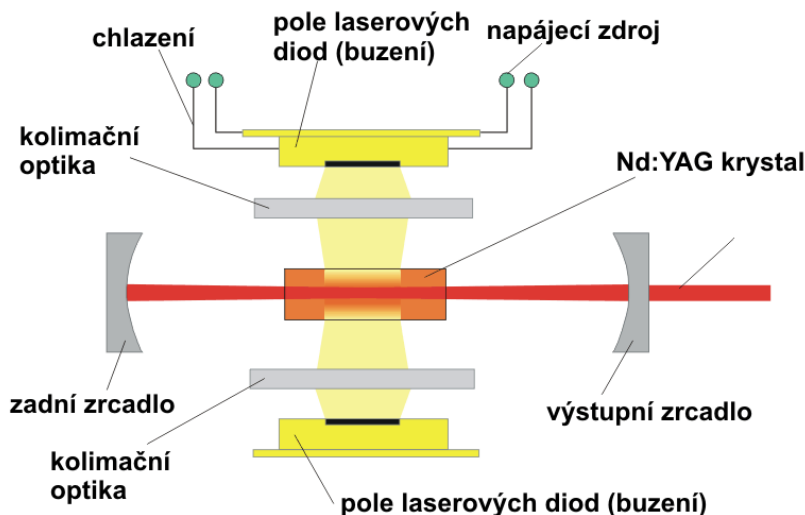


Obr. 17 Výbojkami buzený Nd:YAG laser [4]



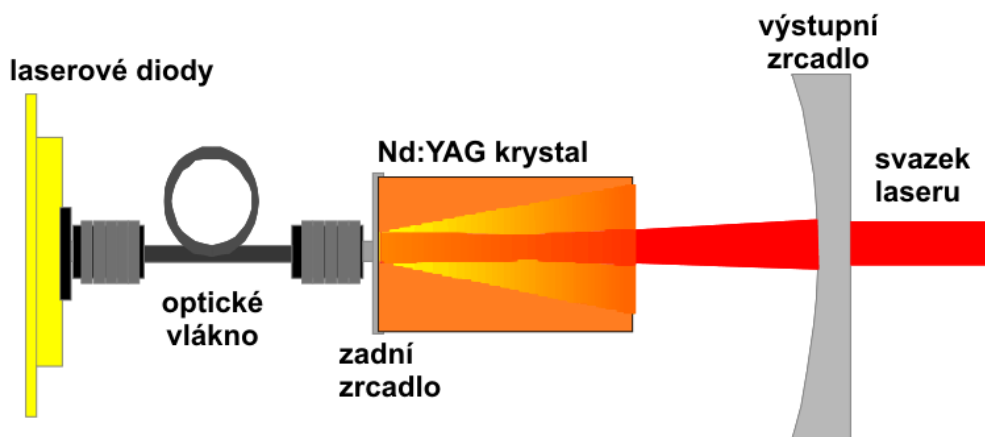
do krystalu. Pro větší odrazivost je dutina pokovena mědí nebo zlatem. Tento typ laseru je provozován hlavně v pulsním režimu a velkou výhodou je vysoká energie pulsu. Nutnost intenzivního chlazení souvisí s malou účinností těchto laserů a další nevýhodou je nízká životnost výbojek. Lampsy vydrží pouze okolo 1000 hodin. Nevýhody se projevují do vyšších provozních nákladů. Aplikují se hlavně při technologii vrtání a svařování, kde se dosahuje hlubokých průvarů a úzkých tepelně ovlivnitelných oblastí.

Podle uspořádání rezonátoru rozlišujeme dva typy Nd:YAG laserů buzenými laserovými diodami. Existují lasery s bočním buzením (transversální, viz obr. 18) nebo zadním buzením (tzv. end-pumped, viz obr. 19). U zadního buzení je z laserových diod vedeno do YAG krystalu pomocí optického vlákna. Diody díky tomu mohou být mimo rezonátor a to je značná výhoda. V porovnání



Obr. 18 Laserovými diodami buzený Nd:YAG laser (zadní buzení) [4]

s bočním buzením má tento typ lepší kvalitu laserového svazku, ale dosahuje nižších výkonů. Obecně DPSS lasery jsou výhodnější než LPSS lasery. Mají podstatně vyšší účinnost, delší životnost a nižší nároky na chlazení. V pulsním režimu se používají pro značení a gravírování a v kontinuálním režimu mají využití při řezání nebo svařování. V dnešní době už je nahrazován vláknovými lasery.

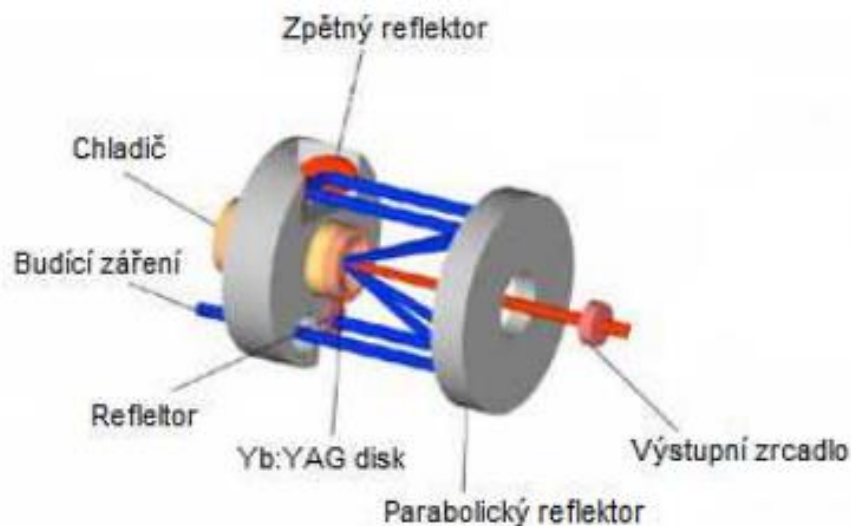


Obr. 19 Laserovými diodami buzený Nd:YAG laser (boční buzení) [4]

### 2.2.3 Diskový laser [4,10,13,16,17,36,37,38]

Diskový laser je druh pevnolátkového laseru, kde aktivní prostředí tvoří tenký disk. Disk může být nejčastěji na bázi Nd:YAG nebo Yb:YAG (dopovaný atomy ytterbia). Záření diskového laseru má vlnovou délku kolem  $1,07 \mu\text{m}$ , a proto ho také můžeme vést optickým vláknem. Podstatný je zde vícenásobný přechod záření od laserové diody přes reflektující vrstvy jedné strany kotouče a okolních reflektorů při čerpání aktivního prostředí (viz obr. 20). Vzniklé teplo je odváděno pomocí kontaktního chladiče, který je připojen k zadní straně disku. Tohle vysoce efektivní chlazení je důvodem kvalitního laserového paprsku i při vysokých výkonech. Celkový výkon u diskových laserů je až 16 kW a účinnost se pohybuje

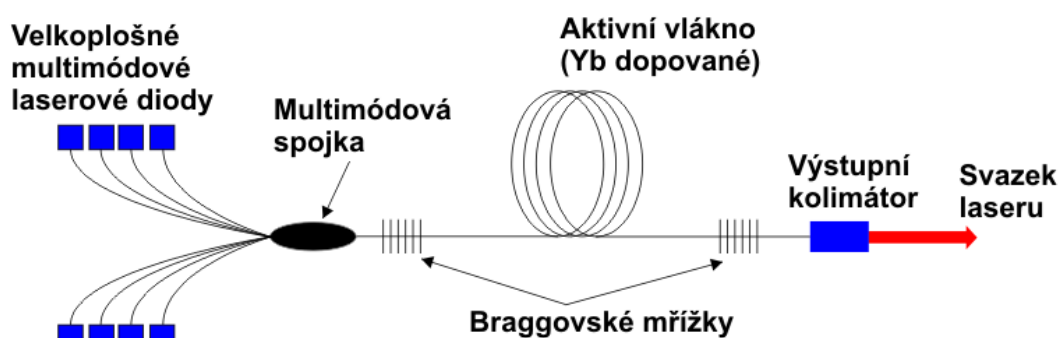
mezi 15 a 20 %. Používá se v kontinuálním režimu a díky tomu, že v tomto režimu dosahuje vysokých výkonů, tak se v praxi aplikují převážně při řezání a svařování kovů.



Obr. 20 Princip diskového laseru [38]

#### 2.2.4 Vlákňový laser [4,10,13,16,17,36,37,38]

Vlákňový laser neboli fiber je z hlediska technologie nejmodernější pevnolátkový laser. Aktivním prostředím je tvořeno velmi tenkým a dlouhým optickým vláknem, které je dopováno ytterbiem. Optické vlákno má funkci rezonátoru a místo zrcadel se zde využívají tzv. Braggovské mřížky. Jedná se o struktury nacházející se na optickém vlákně a díky nim dochází k odrazu paprsku pomocí specifických změn indexu lomu. Záření laserových diod je přes multimódovou optickou spojku převedeno až do optického vlákna, odkud je pomocí optického kolimátoru do okolí v podobě laserového svazku (viz obr. 21).

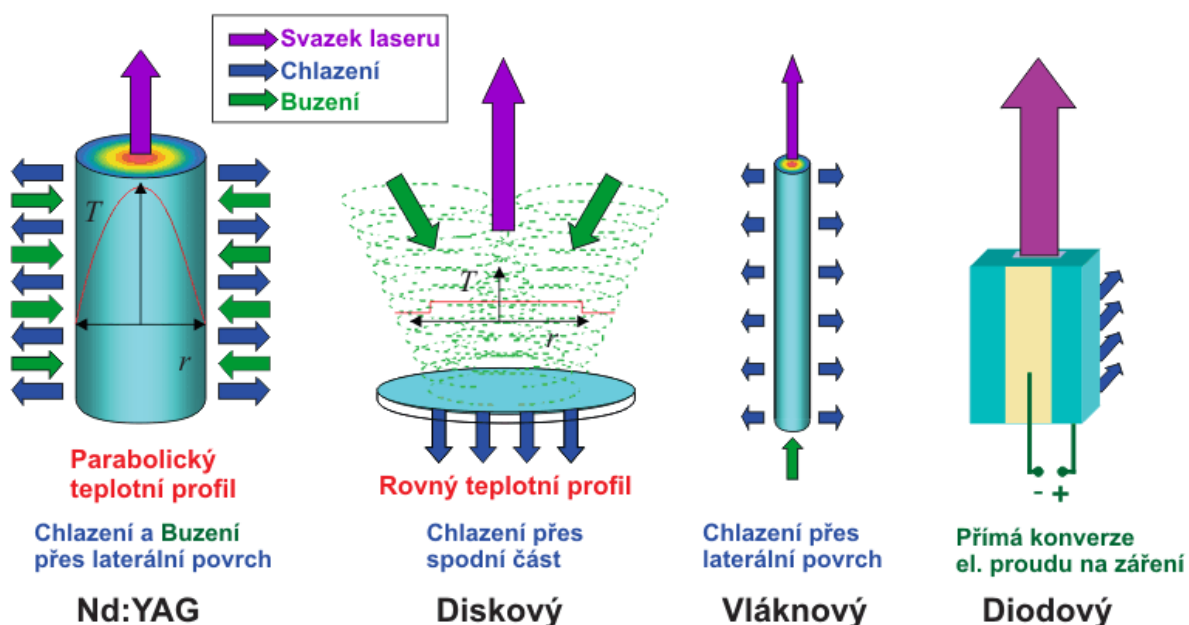


Obr. 21 Princip vlákňového laseru (fiberu) [4]

Vlákňový laser může pracovat v kontinuálním, pulsním i kvazikontinuálním režimu. Z hlediska konstrukce je tento typ laseru velmi jednoduchý, protože se skládá pouze z tenkého optického vlákna a laserového modulu. Spojováním těchto modulů můžeme v dnešní době dosáhnout maximálních výkonů až 100 kW. Vlnová délka záření má hodnotu  $1,07 \mu\text{m}$  a velkou výhodou je účinnost, která může být až 35 %. Dalšími přednostmi vlákňových laserů je velká životnost, vysoká kvalita laserového paprsku, minimální údržba a kompaktní rozměry. Nevýhodou je v dnešní době stále vyšší pořizovací cena. V pulsním režimu se vlákňové lasery aplikují převážně při značení, gravírování nebo mikroobrábění, naopak v kontinuálním režimu se využívají obvykle pro svařování a řezání.

### 2.2.5 Diodový laser [4,10,13,16,17,35,36,37,38]

Diodové lasery jsou někdy označovány jako polovodičové lasery, protože aktivní prostředí je tvořeno polovodičovým materiálem. Občas jsou tyto lasery řazeny i mezi pevnolátkové. Základ aktivního prostředí je PN přechod, který čerpá energii napojením na elektrický proud. Existují injekční polovodičové lasery a polovodičové lasery buzené svazkem elektronů. Protože je elektrický proud na rozdíl od ostatních pevnolátkových laserů měněn rovnou na světelné záření (viz obr. 22), dosahují diodové lasery vysoké účinnosti (až 60 %). Provoz se používá nejčastěji kontinuální. Na zvoleném druhu polovodiče závisí vlnová délka. Nejčastěji se v průmyslu využívají diody na bázi InGaAs nebo AlGaAs, pak je vlnová délka záření 980  $\mu\text{m}$  nebo 808  $\mu\text{m}$ . Jedna laserová dioda má výkon pouze v řádech mW, proto se diody spojují do řad, sloupců a následně se sloupce srovnají do bloku, který nakonec může dosahovat výkonu až 10 kW. Nevýhodou diodového laseru je rozbíhavost paprsku, závislost na teplotě diody aktivního prostředí a pořizovací cena. Proto se v dnešní době využívají hlavně na pájení, kalení, navařování a výjimečně na svařování.



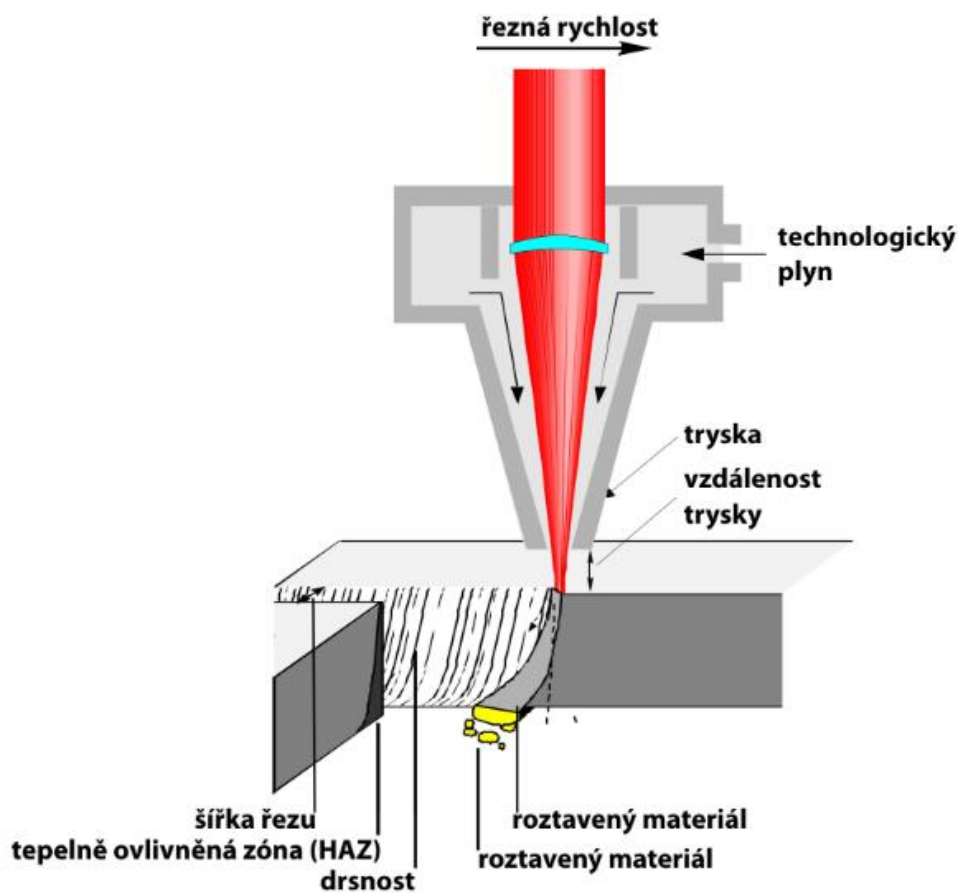
Obr. 22 Porovnání pevnolátkových laserů [4]

### 2.3 Řezání laserem

Počátek laserového řezání spadá do 70. let 20. století, kdy ve Velké Británii byl poprvé uveden laserový systém na řezání ocelových plechů. Jako asistenční plyn se začal používat kyslík. V současnosti je řezání nejvyužívanější laserovou technologií. Aplikuje se ve všech možných odvětvích průmyslu. Výhodou vůči ostatním metodám řezání je vysoká řezná rychlost, kolmý řez a vysoká přesnost. Typický CO<sub>2</sub> laser je v dnešní době čím dál častěji nahrazován laserem vláknovým u technologie řezání. [2,8]

Laserový paprsek díky své vysoké teplotě taví nebo odpařuje celou tloušťku materiálu. Nejprve nastane pouze bodový průnik, kterému se odborně říká zápich. Až po zápichu přejde laser k procesu řezání (viz obr. 23). Při řezání vzniká v materiálu spára, která je vyplněna roztaveným kovem. K odstranění roztaveného kovu se používá řezný plyn, který zároveň chrání fokusační čočku. Podle volby řezného plynu se rozlišují metody řezání. [1,2,6,8]





Obr. 23 Schéma technologie laserového řezání [8]

### 2.3.1 Metody řezání [1,2,5,6,8,27,28,39]

- **Tavné řezání**

Při této metodě laserový svazek pouze nataví materiál a pomocí řezného inertního plynu dojde k vyfouknutí taveniny ze spáry. Chemicky čistý inertní plyn nereaguje s roztaveným kovem, a proto se nepodílí na řezném procesu. Tento typ plynu dokonce odděluje hranu řezu od vzduchu a díky této vlastnosti plynu nedojde k oxidaci a řezná hrana se nemusí dále obrábět. U tavného řezání se používá jako řezný (asistenční) plyn dusík nebo argon (výjimečně vzduch). Z provozního hlediska se jedná o jednu z finančně náročnějších technologií. Zvláště argon patří mezi drahé plyny a spotřeba asistenčních plynů při této metodě je vysoká (cca 50 Nm<sup>3</sup>/hod při tlaku 15 bar). Aplikuje se při vyšších výkonech laseru a při nižších řezných rychlostech. Docílí se velmi kvalitního řezu a metoda je vhodná pro řezání nerezových a barevných kovů. K této metodě lze zařadit i plazmové řezání, kde díky vyšší intenzitě laserového záření v místě řezu vznikne plazma, která pak zpětně rekombinuje a ohřeje materiál. Dochází zde k výraznému zhoršení řezu, ale umožňuje dělení tlustších plechů a zvýšení řezné rychlosti.

- **Oxidační řezání**

Oxidační řezání se od tavného liší tím, že roztavený materiál po použití řezného plynu shoří. Jako asistenční plyn se tady používá kyslík. Ten vyvolává s taveninou exotermickou reakci, která materiál ještě více ohřeje. Díky této reakci se dosahuje až dvojnásobné řezné rychlosti oproti ostatním metodám laserového řezání, ale dochází zde k podstatně menším

výkonům laseru. U této metody je širší a drsnější spára než u předchozí. Je zde horší kvalita řezu (vznikají okraje) a větší tepelně ovlivněná oblast. Laserové řezání s asistencí kyslíku není vhodné pro vytváření malých otvorů, ostrých tvarů a tvarově složitých kontur. Navíc na povrchu vzniká oxidická vrstva, která se většinou musí odstranit. Výhodou je výrazně nižší spotřeba řezného plynu (cca 2 Nm<sup>3</sup>/hod při tlaku 1 bar). Tato metoda se nejčastěji aplikuje při dělení konstrukčních uhlíkatých ocelí.

- **Sublimační řezání**

Sublimační řezání je nejméně využívaná metoda. Díky vysoké intenzitě laserového záření dochází k odpařování materiálu a přivedený asistenční plyn vyfoukne vzniklou kovovou páru z řezné spáry. Podmínkou je, že tloušťka řezaného materiálu nesmí být větší než průměr laserového paprsku. Po nedodržení by mohlo dojít ke svaření řezu vlivem zkondenzovaných plynů. Jako řezný plyn se u sublimačního řezání používá dusík. Další funkcí asistenčního plynu je ochrana optiky a izolace plochy řezu od okolí. Díky této funkci nedochází k oxidaci a řez je kvalitní a bez otřepů. Metoda se aplikuje na nekovové materiály, převážně se sublimačně oddělují tenké fólie nebo textilie.

### 2.3.2 Řezné parametry [1,2,5,6,27,28]

Před samotným procesem řezání obdrží každý operátor řezný plán, který obsahuje výkres s finální podobou laserového výpalku, druh materiálu a program, ve kterém jsou přednastavené všechny řezné parametry od programátora. Dělník je povinen program nahrát do systému a v případě nekvalitního či nepřesného řezu upravit řezné parametry.

- **Režim řezání a zapichování**

V programu, který řídí celý proces řezání, lze nastavit dobu působení laserového paprsku na materiál. Z tohoto pohledu se rozlišuje pulsní a kontinuální režim (zkratka CW - „Continuous waves“).

Při pulsním režimu za pomoci krátkých pulsů o vysoké hustotě výkonu jdou vytvořit velice malé a zároveň jemné startovací otvory. Tenhle případ je vhodný, pokud je potřeba vytvořit startovací otvor přímo na kontuře obrobku. Pulsní režim umožňuje vyřezávání malých otvorů do tlustých plechů a nenastane poškození řezu z důvodů přehřátí. Tento režim má i další přednosti. Díky němu je možné vytváření ostrých špiček bez rádiusu, obtížnějších kontur a vnáší se nižší teplo do materiálu. Je zde ovšem nižší řezná rychlost, a proto nastane zhrubnutí řezu a vzniknou povrchové oxidy.

Zato kontinuální režim spočívá ve spojitém laserovém paprsku o stálém výkonu. Díky vyšší řezné rychlosti je kontinuální režim daleko produktivnější. Avšak vnáší se více tepla do kovu a dojde k většímu rozstříku materiálu při vytváření startovacího otvoru neboli zápichu. Vzniká tedy v materiálu velký kráter od paprsku laseru.

- **Výkon laseru**

Výkon laseru se nastavuje podle maximální tloušťky řezaného materiálu a druhu materiálu. Platí pravidlo, že čím vyšší je nastavený výkon, tím je vyšší možná hodnota tloušťky řezaného materiálu. V kombinaci špatného nastavení výkonu laseru a nevhodné volby ostatních parametrů může dojít ke zhoršení kvality řezné hrany.

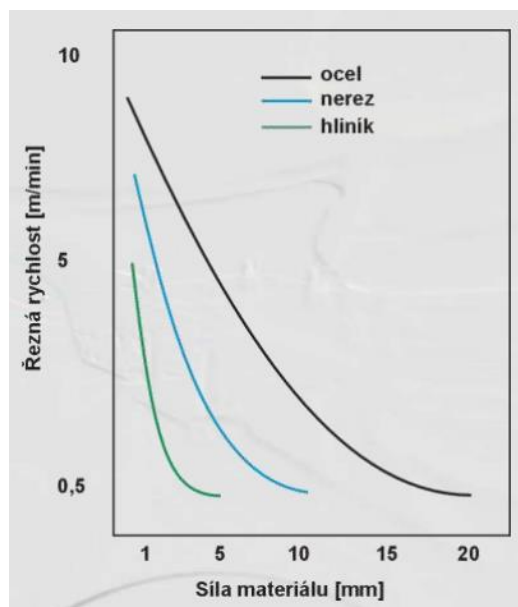
- **Řezná rychlost**

Podobně jako u výkonu laseru závisí volba řezné rychlosti na tloušťce a druhu řezaného materiálu (viz obr. 24). Řeznou rychlost ovlivňuje i metoda laserového řezání, tlak řezného plynu a výkon a typ laseru. Pokud dojde k volbě příliš vysoké řezné rychlosti, nemusí vůbec

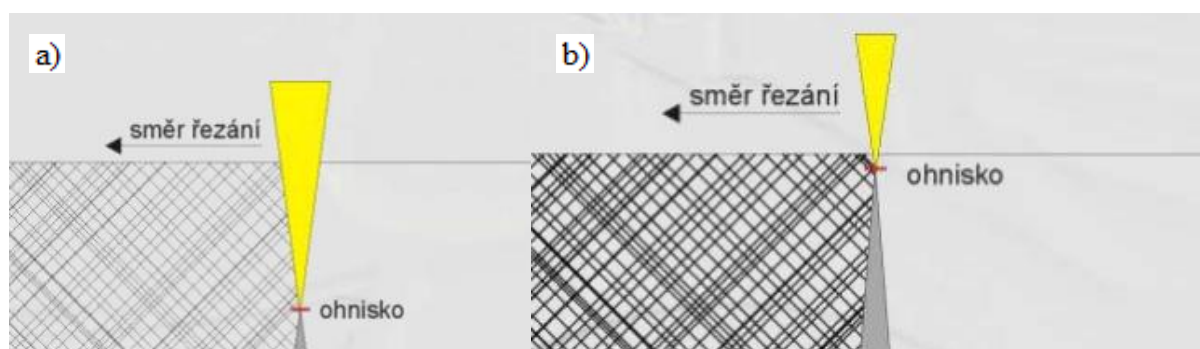
dojít k oddělení materiálu. Naopak při nízké hodnotě zvolené řezné rychlosti může nastat zhrubnutí řezu vlivem vypalování materiálu. S rostoucí tloušťkou řezaného materiálu se řezná rychlost snižuje.

- **Poloha ohniska**

Tento parametr je definován jako nejmenší průměr laserového paprsku s největší energií. Poloha ohniska je velmi důležitý řezný parametr a výrazně ovlivňuje kvalitu řezné hrany. Volba závisí na metodě řezání a druhu řezaného materiálu (viz obr. 25). U tavného řezání je ohnisko umístěno u spodní části plechu, naopak u oxidačního řezání je poloha ohniska umístěna u horní strany plechu. Při sublimačním řezání se ohnisko nachází na povrchu řezaného materiálu. Provádíme-li řezání pomocí plazmy, musíme zohlednit i tloušťku řezaného materiálu. Pro tloušťky plechu do 1,5 mm je zvolena poloha ohniska pod spodní hranu materiálu, kdežto u koroziivzdorných ocelí tloušťky 15 až 20 mm je ohnisko umístěno přibližně uprostřed tloušťky materiálu.



Obr. 24 Závislost řezné rychlosti na tloušťce a druhu řezaného materiálu [2]



Obr. 25 Poloha ohniska  
a) tavné řezání, b) oxidační a tavné řezání [2]

- **Geometrie trysky**

Tvar trysky velmi ovlivňuje kvalitu řezu, drsnost povrchu řezné hrany a tvorbu otřepů. Zásadní pro kvalitu řezu je i souosost laserového paprsku, průměr trysky a vzdálenost trysky od povrchu řezaného materiálu. Průměr trysky také významně určuje spotřebu řezného plynu. U konvenčních trysek se dodržuje kruhový tvar, který se kuželovitě rozšiřuje. Průměr trysky se volí podle šířky drážky řezu. Tyto hodnoty by si měly být přibližně rovny.

- **Tlak řezného plynu**

Zároveň s průměrem trysky tlak řezného plynu ovlivňuje jeho spotřebu. Volba výchozího tlaku asistenčního plynu závisí opět na tloušťce řezaného materiálu. U dusíku se jedná o vysokotlaké řezání (12 až 25 barů), kdežto u kyslíku jsou hodnoty tlaku o poznání nižší. Pohybují se v rozmezí 0,6 do cca 5,5 barů. Při oxidačním řezání se tlak asistenčního plynu snižuje s rostoucí tloušťkou řezaného materiálu.

- **Ohnisková vzdálenost**

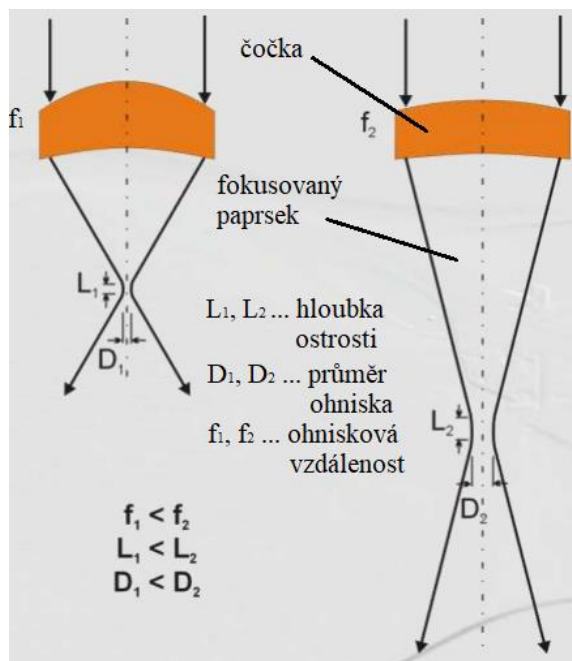
Ohnisková vzdálenost závisí na tloušťce řezaného materiálu. Vzdálenost se mění pomocí použité fokusační čočky nebo optiky, která se nachází v řezné hlavě. Těchto řezných hlav je spousta typů. Roste-li ohnisková vzdálenost, roste i průměr ohniska a Rayleighova délka (viz obr. 26). Tento pojem definuje parametr, který odpovídá hloubce ostrosti.

## 2.4 Stroje pro dělení materiálu laserovou technologií

Pro dělení materiálu pomocí laseru existuje více typů řezných systémů. Převážně se laserovou technologií dělí tabule plechu, a proto se nejvíce využívají 2D dělicí centra, kde konstrukce stroje zajišťuje pohyb v osách X a Y a minimálně i v ose Z. U 3D dělení dochází k pohybu v pěti osách, když jsou osy X, Y a Z doplněny o rotaci a naklápění. Tvarově složité dílce mohou být děleny i pomocí průmyslových robotů. Zvláštním případem řezání je tzv. Remote cutting. Jedná se o dělení materiálu, kdy je statická řezná hlava umístěna vysoko nad obrobkem a pomocí speciální optiky je fokusovaný bod promítán na konkrétní místo obrobku. Tato nekonvenční metoda se využívá především při sublimačním řezání nekovových materiálů. [2,6,8]

Dnes se pro sériové řezání plechů laserovou technologií využívají CNC dělicí centra portálového typu (viz obr. 27). Zkratce CNC (Computer Numerical Control), která v překladu znamená „Počítačové číslicové řízení“, předcházela zkratka NC (Numerical Control = „Číslicové řízení“). U NC strojů se jednalo o klasický obráběcí stroj s elektronickými obvody, který byl vybaven jednoduchým řídicím systémem. Program se ukládal na mechanickou paměť, která měla podobu šablon, váčků nebo mechanických zářezek, které byly časem nahrazeny optickými snímači a děrnými páskami. Úkol dělníka spočíval pouze ve vkládání a vyjímání obráběného polotovaru. Později byly NC obráběcí stroje kvůli pevně propojeným elektronickým prvkům vybaveny počítačem. Od té doby se CNC stroje neustále vyvíjí. Výrazně se urychlilo řízení stroje a programování samotného procesu obrábění. V dnešní době jsou CNC stroje nedílnou součástí strojírenské výroby. [40,41,42,43]

CNC dělicí centra využívají převážně tzv. létající optiku, kdy je řezací hlava pohyblivá a pracovní stůl s tabulí plechu zůstává bez pohybu. Řezací hlava, která je umístěna na příčniku, se pohybuje ve směru os X a Y a kvůli přibližování a oddalování od tabule plechu



Obr. 26 Vliv ohniskové vzdálenosti na průměr ohniska a hloubku ostrosti [2]



Obr. 27 CNC dělicí centrum portálového typu [44]

i v ose Z. Fokusační čočka, kterou řezací hlava obsahuje, je pomocí vyměnitelného ochranného skla chráněna před vystřikujícím materiálem při procesu řezání. Z důvodů značného zvlnění plechu při procesu řezání je v řezací hlavě zabudován integrovaný kapacitní senzor měření vzdálenosti od povrchu řezaného materiálu. Fokus laserového paprsku by měl správně být umístěn na povrchu řezaného plechu a odstup spodní plošky trysky řezné hlavy od materiálu se ve většině případů nastavuje na 0,7 mm. [2,6,8,40]

#### **2.4.1 Pohonné systémy [40,41,42,43]**

Každý obráběcí stroj musí obsahovat pohonný systém, který má za úkol přeměňovat vstupní energii v kinetickou energii a umožnit pohyblivým částem stroje pohyb po ploše nebo v prostoru. Pohonné systémy se dělí na hlavní, vedlejší a pomocné. Hlavní pohonné systémy zajišťují hlavní řezný pohyb a vedlejší pohonné systémy zase vedlejší řezný pohyb. Hlavním řezným pohybem je obvykle pohyb rotační a vedlejším je nejčastěji posuv. Pomocný pohonný systém zabezpečuje různé manipulační, upínací a přídatné funkce. Obecně se pohonný systém skládá z hnacího členu a převodového mechanismu.

Jako hnací člen se používají motory, které se rozlišují buď podle druhu vstupní energie, nebo podle charakteru výstupního pohybu. V prvním případě jsou to elektromotory nebo méně používané hydromotory a ve druhém rotační nebo lineární motory. U rotačních motorů je výstupem krouticí moment a otáčky a u lineárních posuvová síla a rychlost posuvu. Hnací člen je základní částí celého pohonného systému a jeho úkolem je měnit vstupní energii v mechanickou.

Převodové mechanismy mění rozsah rychlostí posuvu nebo otáček a rozsah krouticích momentů nebo posuvových sil. Popřípadě se používají na změnu druhu pohybu (rotační na lineární a naopak).

Parametry mezi hnací a hnanou hřídelí se dají regulovat těmito způsoby:

- a) stupňová změna - mechanicky - ozubený převod
  - řemenový převod
  - elektricky - přepínání motoru
- b) plynulá změna - mechanicky - variátory otáček
  - elektricky - frekvenční měniče
  - hydraulicky - změna odporu tlakového média

Pro přeměnu rotačního pohybu na lineární se používají posuvové mechanismy. Rotační pohyb motoru se změní v přímočarý pohyb pohyblivého dílu rámu obráběcího stroje. Posuvové mechanismy lze rozdělit na mechanismy bez zpětné vazby a na mechanismy se zpětnou vazbou. Moderní obráběcí či dělicí stroje už používají pouze mechanismy se zpětnou vazbou. Díky ní je zabezpečeno, že posouváný díl provede žádané posuvy v jednotlivých osách a je prováděna pomocí odměřovacího zařízení. Odměřovací systémy jsou přímé a nepřímé. U přímých je zjištěna přímo skutečná poloha dílu a u nepřímých se poloha musí přepočítat například z natočení hřídele motoru.

Existují tyto posuvové mechanismy:

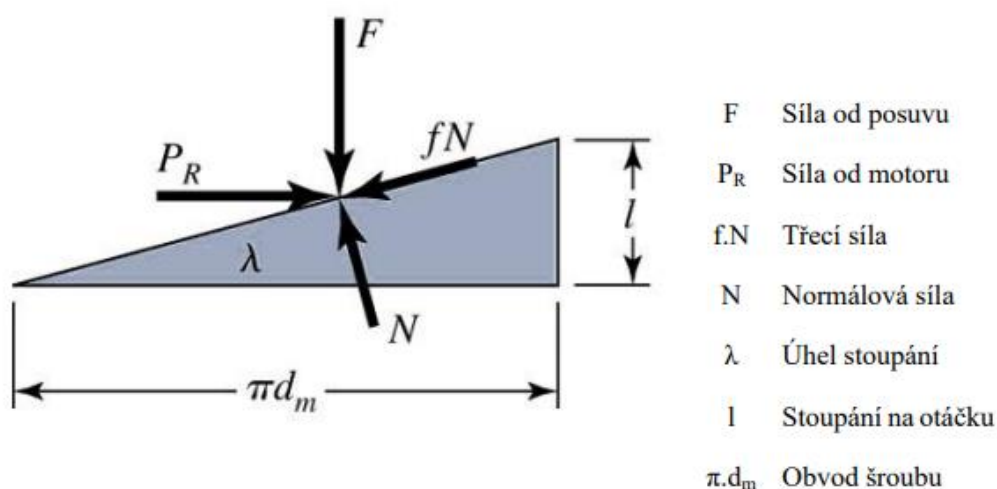
- pohybový šroub
- pastorek a hřeben
- šnek a hřeben
- klikový mechanismus
- kulisový (Whitworthův) mechanismus
- přímý posuv (lineární motor)

Nejčastěji pohybový šroub a ozubený hřeben s pastorkem. Novým trendem se stává přímý posuv. V tomto případě je využit lineární elektromotor místo rotačního a žádný posuvový mechanismus pak není potřeba.

### • Pohybový šroub

Tento posuvový mechanismus se skládá z vlastního šroubu a matice. Co se týče konstrukce strojů, tak rozlišujeme dva typy. Princip tohoto mechanismu je založen na šroubovici, která se skládá z otáčení okolo osy a z posunutí ve směru osy. Síla vytvořená momentem motoru se převede na sílu od posuvu. Rozvineme-li jednu otáčku po šroubovici do roviny, vznikne nám trojúhelník (viz obr. 28). Podle rozložení kinematiky rozdělujeme dva základní typy. Buďto se šroub otáčí a matice se posouvá a je držena proti otáčení, anebo se matice zároveň otáčí i posouvá a držen je šroub.

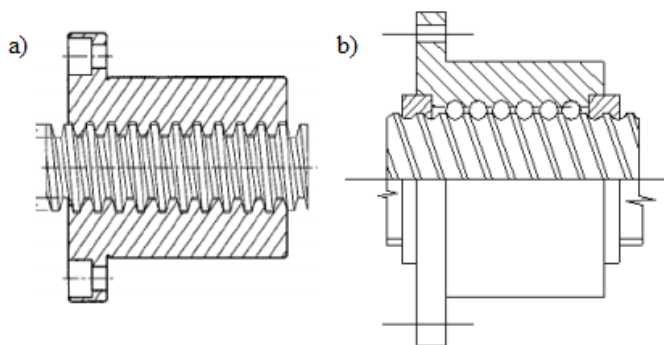
Relativní posuv mezi nástrojem a obrobkem je v přesném vztahu k otáčení nástroje nebo obrobku, a díky tomu je velkou výhodou přesnost pohybu. Podle pootočení šroubu tu lze velmi přesně odvodit odměření polohy posouvané části stroje.



Obr. 28 Rozložení sil u typu pohybového šroubu, kde se matice otáčí i posouvá [40]

Při ohledu na tření se pohybový šroub rozděluje na dva typy:

- a) pohybový šroub s kluzným třením - U této varianty má pohybový šroub lichoběžníkový neboli trapézový závit (viz obr. 29a). Matice je obvykle dělena na dvě části, aby mohlo dojít jejím předepnutím k vymezení vůle posuvového mechanismu. Šroub je vyroben z oceli a matice bývá bronzová, popřípadě litinová. Nevýhodou je, že matice se občas zadírá. Využívá se při menších posuvových rychlostech a při krátkých a méně důležitých posuvech. Například při výsuvu čelistí soustruhu v lícni desce.
- b) pohybový šroub s valivým třením (**kuličkový šroub**) - Mezi vlastním šroubem a maticí obíhají v závitech kuličky (viz obr. 29b), které jsou na konci matice nasměrovány do převáděcího kanálku. Kuličkový šroub má jednodušší vymezení vůle, menší opotřebení závitu a lepší účinnost. Aplikuje se na pohybové osy stroje. Kuličkový šroub je často navrhován pro pojezdy částí strojů a pro výsuvy pinol.



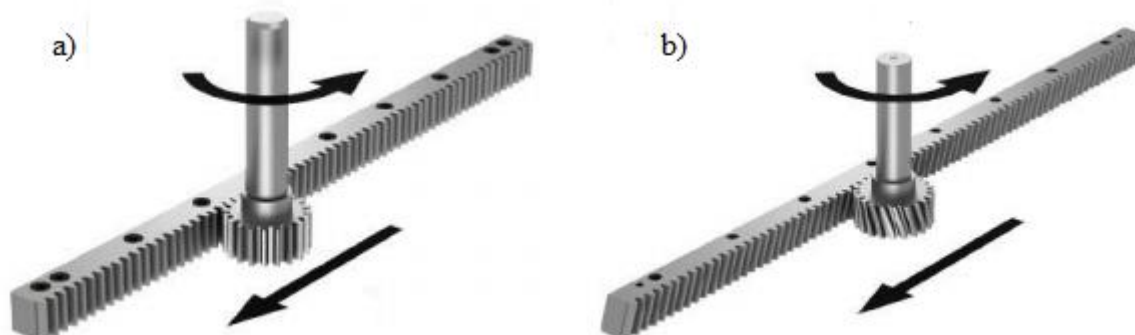
Obr. 29 a) Pohybový šroub s trapézovým závitem  
b) Kuličkový šroub [41]



- **Pastorek a hřeben**

Ozubený hřeben je vlastně část čelního ozubeného kola, které má nekonečný průměr roztečné plochy i ostatních souosých ploch. Rotační pohyb převede pastorek na hřeben, který ho přemění na pohyb posuvný. Existují dva druhy ozubení. Tím jednodušším je přímé ozubení (viz obr. 30a). Nevýhodou však je, že přechod z jednoho zubu na druhý není hladký a je velmi hlučný. Proto se častěji využívá šikmé ozubení (viz obr. 30b). Nejenže je tato metoda podstatně tišší, ale i přechod mezi zuby je znatelně plynulejší. Nevýhodou je však složitější provedení a axiální síly a ohybové momenty, které působí na hřídele a ložiska. Axiální síly se dají eliminovat speciálním provedením šikmého ozubení, které se nazývá šípové ozubení. Výroba tohoto typu je však velmi složitá.

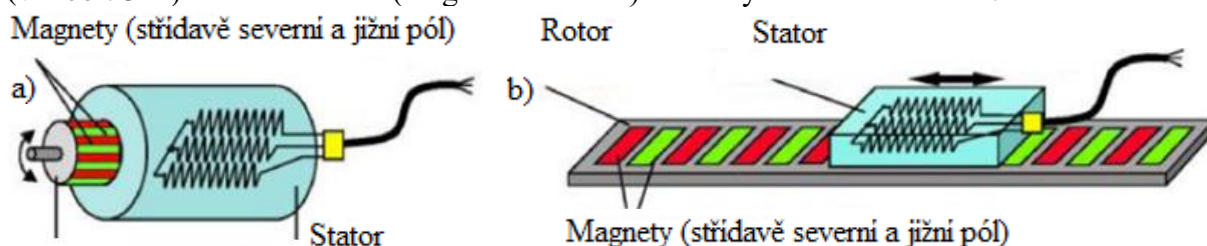
Obecně pastorek s hřebenem má oproti pohybovému šroubu menší převod a přesnost, naopak větší tuhost a lepší účinnost. Pro vymezení vůle je tento mechanismus předepnut pomocí dvou pastorků s mechanickým nebo elektrickým vzájemným předepnutím. Jestliže chceme, aby pastorek s hřebenem byl použit i na odměřování polohy, musí se to zohlednit u výroby. Zuby je nutné nabrousit a vůle musí být vhodně předepnutá. V praxi se tento mechanismus používá u strojů s dlouhými drahami posuvu. CNC dělicí centra s tímto typem pohonu os vyrábí švýcarská firma Bystronic, která aplikuje provedení s přímým ozubením. Dá se určitě mluvit o konkurenceschopné metodě s kuličkovým šroubem.



Obr. 30 a) Přímé ozubení, b) Šikmé ozubení [45]

- **Přímý posuv (lineární motor) [46]**

Metoda přímého posuvu spočívá v nahrazení rotačního motoru lineárním. Není pak tvořen rotační pohyb a odpadá potřeba posuvového mechanismu. Lineární motor funguje na podobném principu jako rotační, akorát je rozvinut do roviny (viz obr. 31). Stator je u lineárního motoru označován jako primární díl a rotor jako sekundární díl. Primární díl se skládá z feromagnetického svazku tvořeného většinou z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí uloženého v drážkách. Sekundární díl je u lineárních motorů tvořen z permanentních magnetů, které jsou upevněny na ocelové podložce. Jeden z dílů musí být pohyblivý. Záleží na provedení, ale většinou je pohyblivý primární díl neboli jezdec (viz obr. 31b). Sekundární díl (magnetická dráha) může být libovolně dlouhá.



Obr. 31 Rozdíl mezi rotačním a lineárním motorem [46]

- a) Rotační motor
- b) Lineární motor

V dnešní době se přímé posuvy velice rozmohly. Velký nárok na této modernizaci má firma z Tchaj-wanu Hiwin, která lineární pohony vyrábí. Zatímco klasický pohon s posuvovým mechanismem má v místech převodu tření (vzniká přebytečné teplo), pružnost a vůli, u přímého posuvu tyto zásadní nevýhody odpadají. Obrovskou výhodou je i vysoká přesnost polohy CNC strojů s tímto pohonem os. Na konečnou přesnost polohování má vliv odměřovací systém. Firma Hiwin využívá dva typy lineárních odměřovacích systémů. Pro aplikace méně náročné na přesnost se vyrábí magnetické lineární odměřovací systémy, u kterých je opakovatelnost polohování 0,005 až 0,007 mm. Pro daleko náročnější technologie na přesnost spolupracuje firma Hiwin s firmou Renishaw. Opakovatelnost polohování těchto lineárních odměřovacích systémů se pohybuje kolem 0,002 mm. Hlavní nevýhodou však je, že k pohyblivé části motoru musí být přiveden napájecí kabel, kabel snímače polohy a popřípadě musí být zajištěn přívod chladicí kapaliny. Vše musí být umístěno do vlečného energetického řetězce. Firma Hiwin v tomhle směru spolupracuje s ověřenými firmami z oboru motorových a signálních kabelů, a to s firmami Igus a Lapp Kabel. Prvky v lineárním pohonu jsou propojeny lineárním vedením, které zabezpečuje pohyb uzlů stroje po geometricky přesných drahách.

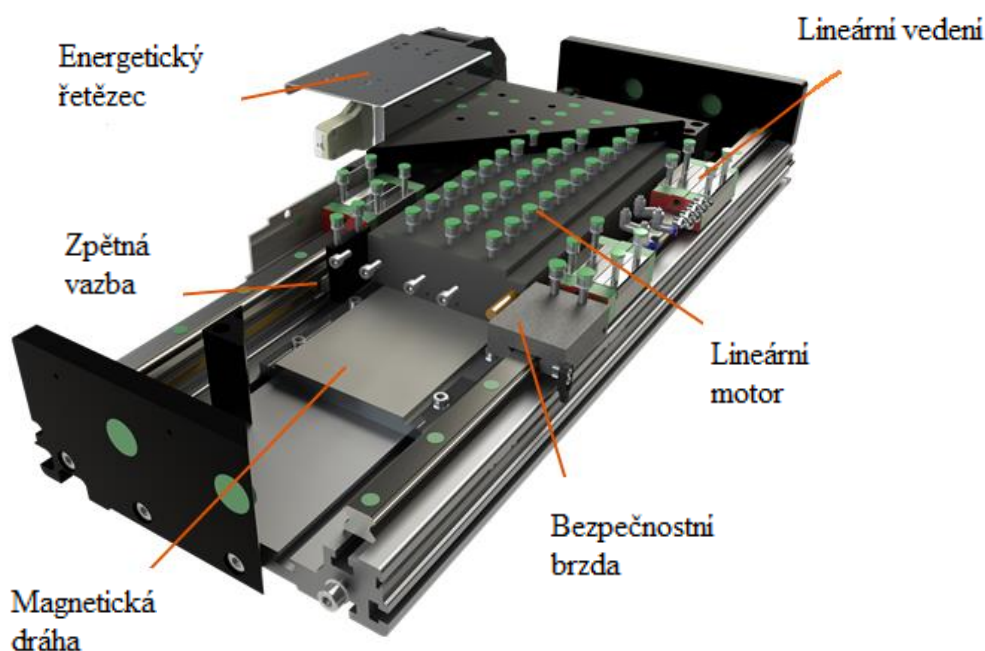
Dalšími výhodami lineárního motoru neomezenost v délce pohybu (délka magnetické dráhy závisí pouze na požadavku zákazníka) a velká rychlost a zrychlení. Na rozdíl od pohonu s rotačním motorem a kuličkovým šroubem se u přímého posuvu nic neotčí, a proto nemůže dojít k vibraci při příliš velkých otáčkách. U kuličkového šroubu dojde k rozkmitání šroubu po překročení mezní hodnoty otáček. Nevýhodou však je, že díky nepřítomnosti převodu u přímého posuvu, musí celou obráběcí sílu lineární motor vykonat sám. Naopak u klasického pohonu se při vyšších otáčkách rotačního motoru otáčky transformují na vyšší tažnou sílu matice kuličkového šroubu. Kvůli této nevýhodě se přímý posuv aplikuje na technologie, kde je potřeba menších obráběcích sil a velkých rychlostí. Další předností je jednoduché řízení a možnost více jezdců na jedné magnetické dráze. Jezdci se mohou pohybovat nezávisle na sobě.

Firma Hiwin vyrábí obvykle třífázové synchronní motory s permanentními magnety. Provedení lineárních motorů má ve třech výrobních řadách.

- a) **LMC** - Tento typ je určen pro lehčí aplikace s maximálním zatížením 342 N (špičková síla). Dalšími parametry je zrychlení 5G a rychlost 5 m/s. Motor tvoří nekovový jezdec a díky tomu je velmi lehký a používá se pro dynamické aplikace.
- b) **LMS** - Špičková síla u této řady je 3000 N, zrychlení 4G a rychlost 4 m/s. Jezdce tentokrát tvoří elektrotechnické plechy s cívkami. Výhodou je velká hustota sil a díky ní jsou motory LMS vhodné pro většinu aplikací.
- c) **LMF** - Zde se jedná o stejnou konstrukci jako v předchozí řadě, vylepšenou o externí chladicí systém, který chladí primární část motoru. Díky tomu je podstatně vyšší účinnost motoru a špičková síla je až 9000 N. LMF motory jsou používány pro obráběcí stroje s velkými přídatnými axiálními silami a přestavenými hmotami. Vhodné pro náročné aplikace z hlediska zatížení.

V praxi se přímé posuvy aplikují v obráběcích strojích, které se používají na vysokorychlostní opracovávání, laserové obrábění, svařování, přesné řezání atd. Vhodné jsou také pro balicí mechanismy, manipulační techniku a automatizaci. V České Republice produkuje CNC dělicí centra s přímým posuvem firma Hiwin s.r.o., která vystupuje pod obchodní značkou FeiCut (viz obr. 32).





Obr. 32 Přímý pohon s lineárním motorem značky FeiCut [46]

## 2.5 Měření laserových výpalků [47,48,49,50]

Přeměřování laserových výpalků je povinná činnost každého CNC operátora. Kvůli nepřesnosti polohování řezacích systémů a vnitřnímu pnutí řezaného materiálu dochází u vyřezaných dílců ke znatelným výchylkám. Vnitřní pnutí tepelně ovlivněného materiálu může u kruhových otvorů způsobit ovalitu a čtvercové výřezky se mohou přiblížit například kosočtvercovým. Mezi povinnostmi dělníka obsluhujícího CNC dělicí centrum spadá zajištění vhodného nastavení řezných parametrů daného procesu, vyřezání zkušebních vzorků a následné přeměření posuvným měřítkem, popřípadě speciálními kalibry (viz obr. 33). Dle normy ČSN EN ISO 9013 určí, jestli vyhovují naměřené úchytky příslušné toleranční třídě.



Obr. 33 Speciální měřicí kalibry  
a) válcové, b) oválné, c) čtvercové [51]

Při měření posuvným měřítkem se předpokládá určitá chyba při měření, proto se pro přesnější zjištění rozměrů používají 3D souřadnicové měřicí stroje, kdy se v kartézském nebo polárním souřadném systému pomocí snímacího zařízení zjistí příslušné body, které měřicí program vyhodnotí a výsledkem je například naměřená hodnota nebo geometrická odchylka tvaru a polohy. Snímací systémy se rozdělují na dotykové a bezdotykové.

Dotykové systémy se v současnosti v praxi nejvíce využívají a dále se dělí na systémy spínacího typu a snímacího typu. Funkčnost spínacího typu se zajišťuje tak, že v okamžiku

kontaktu měřicího dotyku s povrchem měřené součásti spínací sonda vydá signál a dojde k zastavení pohybu a odečtení souřadnic z odměřovacího systému stroje (pravítek). Naopak měřící hrot systému snímacího typu (viz obr. 34) obsahující skenující sondu je při měření v neustálém kontaktu s povrchem měřené součásti. Trvalý kontakt je zajištěn vypnutím přitlaku, který vyvozuje nastavenou měřicí sílu, a zapnutím pohonu příslušných os. O velký vývoj 3D měřicích souřadnicových strojů s dotykovým snímacím systémem se v poslední době postarala švédská firma Hexagon Manufacturing Intelligence.

3D měřicí stroje s bezdotykovým snímacím systémem pracují na principu snímání 3D digitalizace. Bezdotykové 3D měřicí systémy se nazývají 3D skenery, které mohou být buďto vázány na jedno místo (stacionární skenery), nebo lehce přenosné (mobilní skenery). Dle použité technologie snímání existují různé typy 3D skenerů, například optické, laserové, mechanické, destruktivní, ultrazvukové a rentgenové. Nejčastějším typem v praxi jsou optické 3D skenery, kdy se digitální 3D podoba reálné součásti získá měřením třetí souřadnice pomocí optické metody triangulace a interference světla. Měřený objekt se nasnímá (nafotí) z několika úhlů a data jsou následně odeslána do PC ke zpracování. Nevýhoda optických skenerů je nerozpoznání neprůchozích děr z 2D obrázků (na rozdíl od např. laserových 3D skenerů). Mezi nejnovější typy mobilních optických 3D skenerů patří ATOS Triple Scan (viz obr. 35), u kterého je princip skenování následující. Na měřenou součást se pravidelně rozmístí pomocné značky, díky kterým systém vypočítá polohu měřicích senzorů a naměřené hodnoty transformuje přímo do souřadného systému objektu. Na povrch měřené součásti jsou promítané pruhy světla, které jsou dvěma kamerami nasnímány z různých úhlů. Díky

digitálnímu zpracování obrazu se vypočítají 3D souřadnice každého pixelu na snímku. Výhodou 3D skenerů je menší časová náročnost a naměření hodnot, kam se měřicí dotyk u dotykových systémů nedostane.

3D měřicí souřadnicové systémy díky své vysoké pořizovací ceně nebývají příliš pravidlem v průmyslových firmách. Většina závodů se musí spokojit s klasickým přeměřováním dílů posuvnými měřidly.



Obr. 34 3D měřicí souřadnicový stroj s dotykovým snímacím systémem [48]

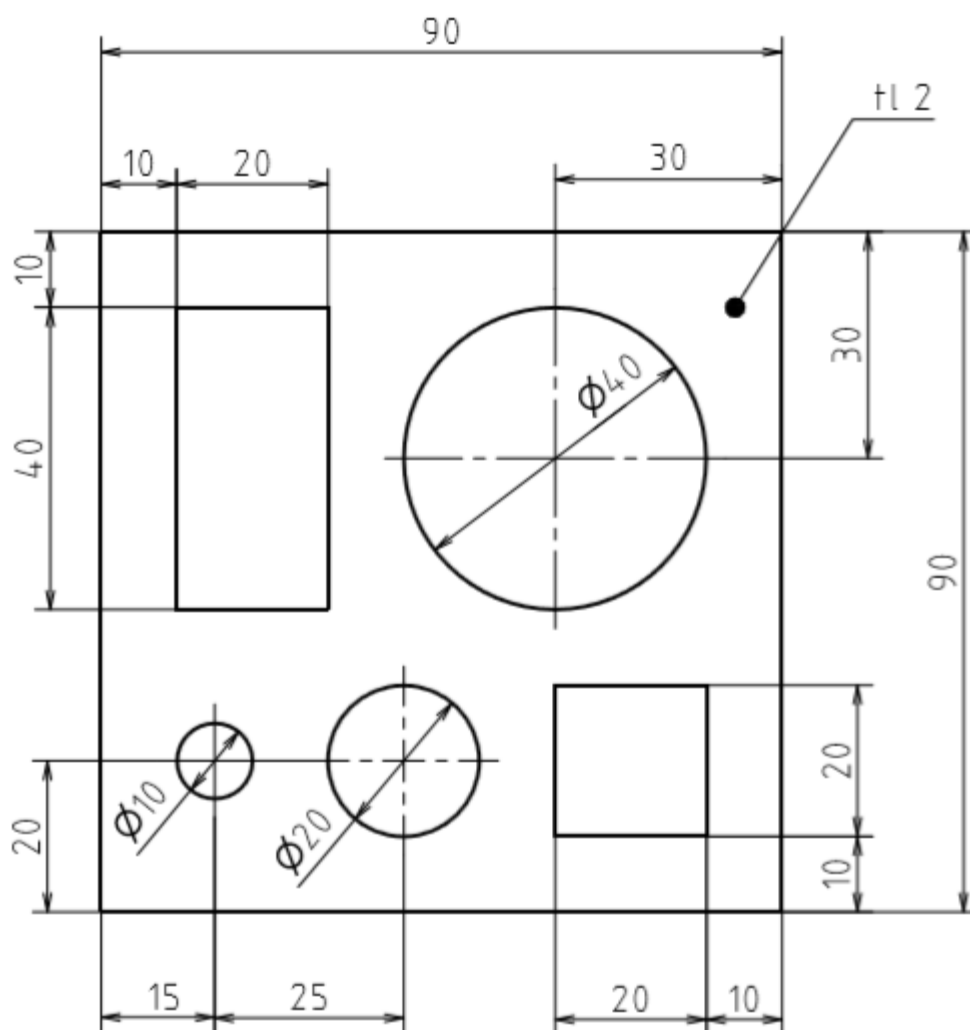


Obr. 35 Optický 3D skener ATOS Triple Scan [50]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V praktické části bylo provedeno vyřezání vzorků (viz obr. 36) z plechu na dvou CNC dělicích centrech, kdy jedno dělicí centrum bylo poháněno pomocí pastorku a ozubeného hřebene

a druhé lineárním motorem. Na obou strojích bylo vykonáno tavné i oxidační řezání. V prvním případě byl jako asistenční plyn použit dusík a u oxidační metody byla asistence kyslíku jako řezného plynu. Po vyřezání celkem čtyř vzorků byly laserové výpalky přeměřeny posuvným měřítkem a pro přesnější měření a detailnější analýzu i na 3D souřadnicových dotykových měřících systémech. Tyto 3D měřící stroje byly poskytnuty ve dvou firmách, a proto se naskytla možnost určitého srovnání. Po provedení přeměření laserových výpalků a zjištění způsobených odchylek řezným procesem se dle normy ČSN EN ISO 9013 zařadily hodnoty do příslušných tolerančních tříd. Výsledkem a žádoucím cílem bylo vyhodnocení nejpřesněji vyřezaného vzorku a určení nejvhodnější metody řezání pro daný materiál a rozměry laserového výpalku.



Obr. 36 Model laserového výpalku v Inventoru (viz příloha 1)

### 3.1 Vstupní informace

- **Materiál vzorků:**

**ČSN 11321 (DC01)** - Atestovaná (viz příloha 2), hlubokotažná, nelegovaná, jakostní ocel. Dolní mez kluzu této oceli je 280 MPa, mez pevnosti v rozmezí 270 až 410 MPa a tažnost minimálně 28 %. Vhodná k tváření za studena (válcování), středně hlubokému tažení, lakování, pokovování v tavenině, potisku a smaltování (jen u neuklidněné oceli). Svařitelnost zaručená v závislosti na rozměrech polotovaru. [52]

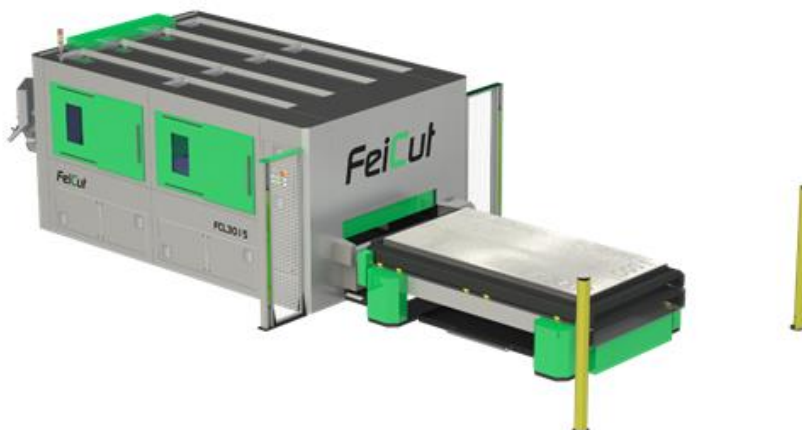
- **CNC dělicí centra:**

**Bystronic BySprint Fiber 3015** (viz obr. 37) - Zařízení, které vlastní brněnská firma Aquadem s.r.o., obsahuje vláknový laser a umožňuje maximální výkon laseru až 3 kW. Pohon os zajišťuje rotační motor s posuvovým mechanismem, který funguje na principu pastorku s ozubeným hřebenem. Umožňuje laserově dělit konstrukční oceli do 12 mm, nerezové oceli do 10mm a hliník s mosazí do 6 mm. Maximální rozměr plechu 1500 x 3000 mm. Stroj je včetně automatizace ByTrans, která obsahuje s laserem pevně spojený zakladač ro automatické založení a odebrání materiálů. [53]



Obr. 37 Bystronic BySprint Fiber 3015s automatizací ByTrans [54]

**FeiCut FCL 3015/5000 W** (viz obr. 38) - Opět využívá vláknového laseru a rozměry pracovního stolu jsou 1500 x 3000 mm. Maximální možný výkon laseru dosahuje hodnoty 5 kW. Pohon os zajišťuje lineární motor se zrychlením 2,5G, opakovatelností  $\pm 0,01$  mm a přesností 0,04 mm. Stroj je vybaven dvěma výměnnými stoly a bočními kryty pro snadný přístup do pracovního prostoru. [46]

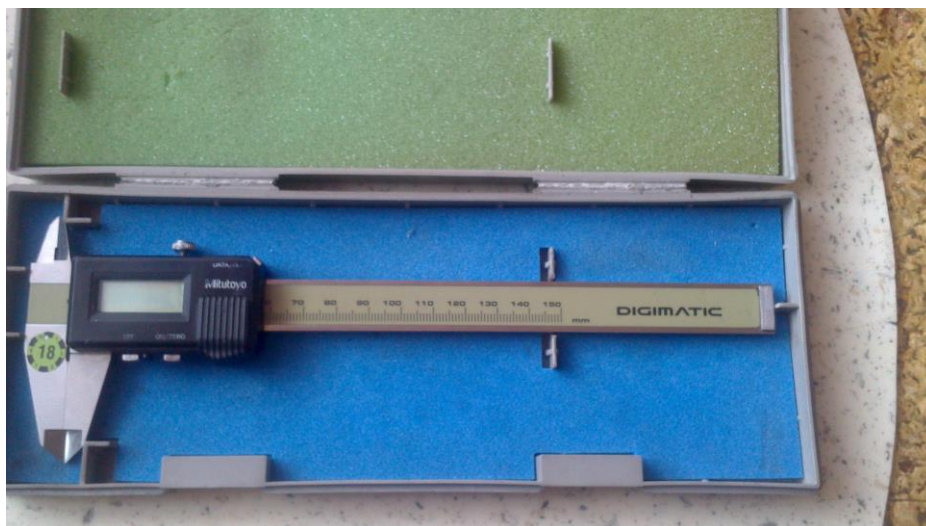


Obr. 38 FeiCut FCL 3015 [55]



- **Měřicí přístroje:**

**Digitální posuvné měřítko Mitutoyo** (viz obr. 39) - zapůjčené ze slévárny firmy Siemens elektromotory v Mohelnici.



Obr. 39 Digitální posuvné měřítko Mitutoyo

**3D souřadnicový měřicí stroj DEA Global Silver Performance 09.20.08** (viz obr. 40) - Jedná se o portálový 3D měřicí stroj vybavený otáčnou hlavou s dotykovým senzorem s vysokou přesností. Měření bylo poskytnuto opět v mohelnickém závodě Siemens elektromotory. Stroj je vybaven pojezdem osy X: 900 mm, osy Y: 2000 mm a osy Z: 800 mm. Měřicí objem stroje je 1,44m<sup>3</sup>, maximální možná hmotnost měřené součásti 1800 kg a přesnost měření dosahuje  $MPEE = 1,8 + L/333 \mu m$ ,  $MPEP = 1,8 \mu m$  a  $MPETHP = 2,9 \mu m$ . [56]



Obr. 40 Trisouřadnicový měřicí stroj DEA Global Silver Performance 09.20.08 [56]

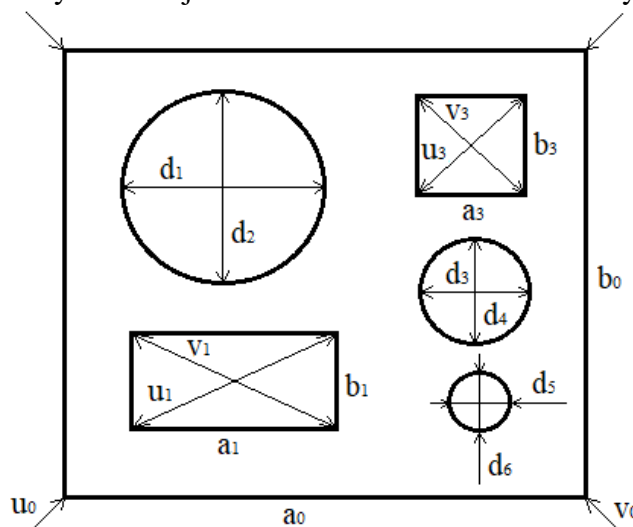
**3D souřadnicový měřicí stroj DEA Global Silver Classic 09.20.08** (viz obr. 41) - Velmi podobný typ měřicího centra jako v přechozím případě, tentokrát poskytnutý brněnskou firmou Aquadem s.r.o. Pojezdy os má totožné jako stroj z firmy Siemens elektromotory. Přesnosti měření dosahují hodnot  $MPEE = 2,2 + L/300 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $MPEP = 2,2 \text{ } \mu\text{m}$  a  $MPETHP = 3,9 \text{ } \mu\text{m}/68 \text{ s}$ . Stroj je vybavený NC indexovatelnou hlavou TesaStar a skenovací sondou Leitz LSP-X1s. [57]



Obr. 41 Trísouřadnicový měřicí stroj DEA Global Silver Classic 09.20.08 [58]

### 3.2 Výsledky měření

V první řadě bylo provedeno běžné měření kalibrovaným digitálním posuvným měřítkem značky Mitutoyo (viz tab. 1), díky kterému zjistíme délky stran a uhlopříčky čtvercových a obdélníkových obrazců a průměry kruhových otvorů vyřezaného vzorku (viz obr. 42). Pro zjištění chyby měření při použití posuvného měřítka se přeměření otvorů provedlo i na vyšší úrovni. Přesnější souřadnicové měření bylo aplikováno na 3D měřicím stroji DEA Global Silver Performance 09.20.08 (viz tab. 2). Kvůli příliš velkému průměru měřicího dotyku jsou uhlopříčky pouze teoreticky vypočteny. Zapůjčení posuvného měřítka i poskytnutí změření vzorků na 3D měřicím systému zajistila firma Siemens elektromotory v Mohelnici.



Obr. 42 Náskres vyřezaného vzorku pro 1. a 2. měření

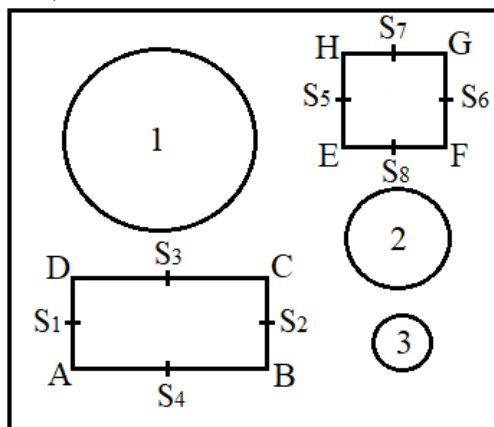
Tab. 1 Přehled naměřených hodnot digitálním posuvným měřítkem Mitutoyo.

	<b>a<sub>0</sub></b> [mm]	<b>b<sub>0</sub></b> [mm]	<b>u<sub>0</sub></b> [mm]	<b>v<sub>0</sub></b> [mm]	<b>a<sub>1</sub></b> [mm]	<b>b<sub>1</sub></b> [mm]	<b>u<sub>1</sub></b> [mm]	<b>v<sub>1</sub></b> [mm]	<b>a<sub>3</sub></b> [mm]
<b>I-O</b>	90,02	90,04	127,00	127,08	39,98	19,93	44,47	44,25	19,96
<b>I-N</b>	90,04	90,06	127,28	127,30	40,00	19,96	44,56	44,36	19,99
<b>II-O</b>	89,85	89,88	126,81	126,84	40,03	20,06	44,62	44,35	20,05
<b>II-N</b>	90,08	90,05	127,10	127,13	39,97	19,95	44,46	44,25	19,95
	<b>b<sub>3</sub></b> [mm]	<b>u<sub>3</sub></b> [mm]	<b>v<sub>3</sub></b> [mm]	<b>d<sub>1</sub></b> [mm]	<b>d<sub>2</sub></b> [mm]	<b>d<sub>3</sub></b> [mm]	<b>d<sub>4</sub></b> [mm]	<b>d<sub>5</sub></b> [mm]	<b>d<sub>6</sub></b> [mm]
<b>I-O</b>	19,92	27,98	27,94	39,92	39,94	19,93	19,96	9,92	9,95
<b>I-N</b>	19,96	28,04	28,05	40,01	40,00	19,99	19,98	10,00	9,98
<b>II-O</b>	20,04	28,16	28,18	40,08	40,04	20,08	20,05	10,08	10,06
<b>II-N</b>	19,94	27,97	27,98	39,94	39,92	19,96	19,93	9,95	9,93

Tab. 2 Přehled naměřených hodnot 3D měřícím strojem DEA Global Silver Performance 09.20.08 (viz příloha 3, 4, 5 a 6).

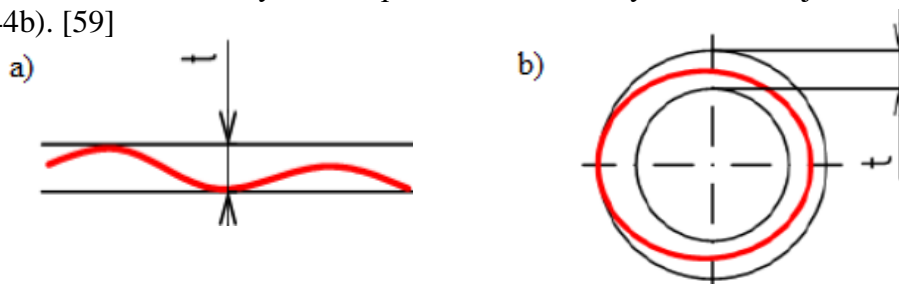
	<b>a<sub>0</sub></b> [mm]	<b>b<sub>0</sub></b> [mm]	<b>u<sub>0</sub></b> [mm]	<b>v<sub>0</sub></b> [mm]	<b>a<sub>1</sub></b> [mm]	<b>b<sub>1</sub></b> [mm]	<b>u<sub>1</sub></b> [mm]	<b>v<sub>1</sub></b> [mm]	<b>a<sub>3</sub></b> [mm]
<b>I-O</b>	90,009	90,021	127,312	127,288	39,993	19,977	44,689	44,719	19,970
<b>I-N</b>	90,033	90,054	127,351	127,332	40,015	20,020	44,740	44,748	19,999
<b>II-O</b>	89,826	89,858	127,070	172,039	40,053	20,092	44,822	44,797	20,091
<b>II-N</b>	90,060	90,027	127,360	127,322	39,969	19,959	44,678	44,671	19,959
	<b>b<sub>3</sub></b> [mm]	<b>u<sub>3</sub></b> [mm]	<b>v<sub>3</sub></b> [mm]	<b>d<sub>1</sub></b> [mm]	<b>d<sub>2</sub></b> [mm]	<b>d<sub>3</sub></b> [mm]	<b>d<sub>4</sub></b> [mm]	<b>d<sub>5</sub></b> [mm]	<b>d<sub>6</sub></b> [mm]
<b>I-O</b>	19,977	28,247	28,245	39,982	39,969	19,970	19,955	9,945	9,977
<b>I-N</b>	20,003	28,285	28,287	40,015	40,000	20,000	20,000	10,005	9,989
<b>II-O</b>	20,079	28,411	28,398	40,085	40,075	20,083	20,079	10,103	10,081
<b>II-N</b>	19,956	28,228	28,220	39,980	39,933	19,980	19,922	9,971	9,932

Pro detailnější analýzu laserových výpalků byly vzorky změřeny ve firmě Aquadem s.r.o. sídlící v Brně. Firma využívá 3D měřící CNC systém, který prověřil i přímot a kruhovitosť vyřezaných otvorů. Jedná se o 3D měřící stroj DEA Global Silver Classic 09.20.08. Dle obr. 43 byly u kruhových otvorů zjišťovány nejmenší a největší průměry a výchylky kruhovitosti (viz tab. 3) a u čtyřúhelníkových otvorů vzdálenosti středů protějších stran, uhlopříčky a výchylky přímotosti (viz tab. 4).



Obr. 43 Návrh vyřezaného vzorku pro 3. měření

Přímost i kruhovitost jsou ve strojírenství často používané geometrické tolerance. Tolerance přímosti je vyhovující, jestliže skutečná přímka leží mezi dvěma rovnoběžnými přímkami. Hodnota tolerance je vzdálenost mezi rovnoběžkami (viz obr. 44a). Naopak dostatečná tolerance kruhovitosti je v případě, když skutečný profil leží mezi dvěma soustřednými kružnicemi, kdy rozdíl průměrů soustředných kružnic je hodnota tolerance (viz obr. 44b). [59]



Obr. 44 Geometrické tolerance: a) přímost, b) kruhovitost [59]

Tab. 3 Přehled naměřených hodnot kruhových otvorů 3D měřicím strojem DEA Global Classic 09.20.08 (viz příloha 7, 8, 9 a 10).

	$d_{1max}$ [mm]	$d_{1min}$ [mm]	○ (1) [mm]	$d_{2max}$ [mm]	$d_{2min}$ [mm]	○ (2) [mm]	$d_{3max}$ [mm]	$d_{3min}$ [mm]	○ (3) [mm]
<b>I-O</b>	39,960	39,928	0,035	19,961	19,925	0,035	9,954	9,918	0,032
<b>I-N</b>	40,026	39,984	0,046	20,035	20,007	0,033	10,043	10,016	0,049
<b>II-O</b>	40,063	40,045	0,022	20,079	20,052	0,028	10,091	10,070	0,032
<b>II-N</b>	40,011	39,967	0,052	19,984	19,938	0,055	9,980	9,949	0,045

Tab. 4 Přehled naměřených hodnot čtyřúhelníkových otvorů 3D měřicím strojem DEA Global Silver Classic 09.20.08 (viz příloha 7, 8, 9 a 10).

	$ S_1S_2 $ [mm]	$ S_3S_4 $ [mm]	$ AC $ [mm]	$ BD $ [mm]	— (AB) [mm]	— (BC) [mm]	— (CD) [mm]	— (DA) [mm]
<b>I-O</b>	39,987	20,020	44,777	44,654	0,018	0,029	0,027	0,359
<b>I-N</b>	40,031	20,033	44,757	44,770	0,003	0,004	0,005	0,007
<b>II-O</b>	40,125	20,164	44,923	44,892	0,002	0,003	0,002	0,002
<b>II-N</b>	39,978	19,959	44,692	44,677	0,003	0,005	0,002	0,002
	$ S_5S_6 $ [mm]	$ S_7S_8 $ [mm]	$ EG $ [mm]	$ FH $ [mm]	— (EF) [mm]	— (FG) [mm]	— (GH) [mm]	— (EH) [mm]
<b>I-O</b>	20,053	20,035	28,354	28,339	0,018	0,024	0,018	0,016
<b>I-N</b>	20,042	20,035	28,333	28,344	0,003	0,003	0,004	0,003
<b>II-O</b>	20,149	20,161	28,515	28,494	0,004	0,003	0,002	0,002
<b>II-N</b>	19,961	19,957	28,240	28,214	0,003	0,003	0,002	0,002

Vysvětlivky:

I-O ... Vzorek vyřezaný na Bystronic BySprint Fiber 3015 oxidační metodou řezání

I-N ... Vzorek vyřezaný na Bystronic BySprint 3015 tavnou metodou řezání

II-O ... Vzorek vyřezaný na FeiCut FCL 3015/5000 W oxidační metodou řezání

II-N ... Vzorek řezaný na FeiCut FCL 3015/5000 W tavnou metodou řezání

○ ... Značka výchylky kruhovitosti

— ... Značka výchylky přímosti



### 3.3 Zařazení výsledků měření do tolerančních tříd

Po sepsání naměřených hodnot do tabulek je patrné, že navrhnuté hodnoty v počítačovém systému nejsou totožné s naměřenými. Je tedy zřejmé, že všechny čtyři typy řezného procesu vykazují znatelné výchylky a spadají do určité toleranční třídy. Značné jsou i chyby měření při použití posuvného měřítka. Přesnější 3D měřicí systém nám potvrdil, že oko člověka není neomylné.

Z detailnější analýzy vyřezaných otvorů pomocí třetího měření vzorků lze naměřené hodnoty zařadit do příslušných tolerančních tříd dle normy ČSN EN ISO 9013 (viz příloha 11) a následně vyhodnotit nejvýhodnější metodu řezání pro dané rozměry laserového výpalku a daný materiál plechové tabule. Zjistíme největší odchylku daného jmenovitého rozměru a následně

z norem vyčteme, v jaké toleranční třídě se hodnota nachází (viz tab. 5,6,7 a 8).

Tab. 5 Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů vzorku I-O a zařazení do příslušných tolerančních tříd (viz příloha 11).

Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů [mm]	Toleranční třída
$40 - d_{1\min} = 40 - 39,928 = 0,072$	1
$20 - d_{2\min} = 20 - 19,925 = 0,075$	1
$10 - d_{3\min} = 10 - 9,918 = 0,082$	1
$40 -  S_1S_2  = 40 - 39,987 = 0,013$	1
$ S_3S_4  - 20 = 20,020 - 20 = 0,020$	1
$ AC  - 44,721 = 44,777 - 44,721 = 0,056$	1
$44,721 -  BD  = 44,721 - 44,654 = 0,067$	1
$ S_5S_6  - 20 = 20,053 - 20 = 0,053$	1
$ S_7S_8  - 20 = 20,035 - 20 = 0,035$	1
$ EG  - 28,284 = 28,354 - 28,284 = 0,070$	1
$ FH  - 28,284 = 28,339 - 28,284 = 0,055$	1

Tab. 6 Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů vzorku I-N a zařazení do příslušných tolerančních tříd (viz příloha 11).

Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů [mm]	Toleranční třída
$d_{1\max} - 40 = 40,026 - 40 = 0,026$	1
$d_{2\max} - 20 = 20,035 - 20 = 0,035$	1
$d_{3\max} - 10 = 10,043 - 10 = 0,043$	1
$ S_1S_2  - 40 = 40,031 - 40 = 0,031$	1
$ S_1S_2  - 20 = 20,033 - 20 = 0,033$	1
$ AC  - 44,721 = 44,757 - 44,721 = 0,036$	1
$ BD  - 44,721 = 44,770 - 44,721 = 0,049$	1
$ S_5S_6  - 20 = 20,042 - 20 = 0,042$	1
$ S_7S_8  - 20 = 20,035 - 20 = 0,035$	1
$ EG  - 28,284 = 28,333 - 28,284 = 0,049$	1
$ FH  - 28,284 = 28,344 - 28,284 = 0,060$	1

Tab. 7 Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů vzorku II-O a zařazení do příslušných tolerančních tříd (viz příloha 11).

Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů [mm]	Toleranční třída
$d_{1\max} - 40 = 40,063 - 40 = 0,063$	1
$d_{2\max} - 20 = 20,079 - 20 = 0,079$	1
$d_{3\max} - 10 = 10,091 - 10 = 0,091$	1
$ S_1S_2  - 40 = 40,125 - 40 = 0,125$	1
$ S_3S_4  - 20 = 20,164 - 20 = 0,164$	1
$ AC  - 44,721 = 44,923 - 44,721 = 0,202$	1
$ BD  - 44,721 = 44,892 - 44,721 = 0,171$	1
$ S_5S_6  - 20 = 20,149 - 20 = 0,149$	1
$ S_7S_8  - 20 = 20,161 - 20 = 0,161$	1
$ EG  - 28,284 = 28,515 - 28,284 = 0,231$	2
$ FH  - 28,284 = 28,494 - 28,284 = 0,210$	2

Tab. 8 Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů vzorku II-N a zařazení do příslušných tolerančních tříd (viz příloha 11).

Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů [mm]	Toleranční třída
$40 - d_{1\min} = 40 - 39,967 = 0,033$	1
$20 - d_{2\min} = 20 - 19,938 = 0,062$	1
$10 - d_{3\min} = 10 - 9,949 = 0,051$	1
$40 -  S_1S_2  = 40 - 39,978 = 0,022$	1
$20 -  S_3S_4  = 20 - 19,959 = 0,041$	1
$44,721 -  AC  = 44,721 - 44,692 = 0,029$	1
$44,721 -  BD  = 44,721 - 44,677 = 0,044$	1
$20 -  S_5S_6  = 20 - 19,961 = 0,039$	1
$20 -  S_7S_8  = 20 - 19,957 = 0,043$	1
$28,284 -  EG  = 28,284 - 28,240 = 0,044$	1
$28,284 -  FH  = 28,284 - 28,214 = 0,070$	1

#### 4 DISKUZE A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Z hlediska úchylek jmenovitých rozměrů se všechny vzorky kromě laserového výpalku vyřezaného na CNC dělicím centru FeiCut FCL 3015/5000 W oxidační metodou řezání (vzorek II-O) vešly do toleranční třídy číslo 1. V ohledu úchylek přímosti u čtyřúhelníkových otvorů je nejméně vhodná metoda oxidačního řezání provedená na stroji Bystronic BySprint Fiber 3015 (vzorek I-O). Je tedy patrné, že vhodnější metoda řezání pro dané rozměry laserového výpalku a zvolený materiál je tavná.

Zbylé dva vzorky vyřezané pomocí tavné metody dělení materiálu mají srovnatelné odchylky po změření. V podrobném srovnání vychází přesněji řezání strojem Bystronic BySprint Fiber 3015 (viz obr. 45), který využívá pohon os pomocí pastorku a ozubeného hřebene. Přesněji vyřezané jsou hlavně kruhové otvory, z hlediska výchylek jmenovitých rozměrů i výchylek kruhovitosti. U této varianty byl i více dodržen tvar čtvercového a obdélníkového otvoru, kdy u stroje s lineárním pohonem díky odchylkám uhlopříček více připomínaly kosočtverec s kosodélníkem. Naopak u tavného řezání strojem FeiCut FCL 3015/5000 W byla nepatrně více dodržena podmínka přímosti.



Obr. 45 Dělení materiálu na CNC dělicím centru Bystronic BySprint Fiber 3015

## 5 ZÁVĚRY

V práci byla přiblížena problematika teorie laseru, laserového řezání a konstrukce CNC strojů. Cílem práce bylo porovnání přesnosti dělení plechové tabule pomocí vláknového laseru na CNC dělicích strojích s různým pohonem os, která závisí na přesnosti polohování stroje a na vnitřním pnutí materiálu.

Ve firmě Aquadem s.r.o. byl poskytnut stroj, který na přeměnu rotačního pohybu v posuvný využívá pastorek s ozubeným hřebenem, naopak ve firmě Hiwin s.r.o. byly vzorky vyřezány na stroji s lineárním motorem, který funguje na principu přímého posuvu. Proces řezání na obou strojích byl proveden dvakrát, nejprve s použitím kyslíku jako řezného plynu a posléze s použitím dusíku.

Vzorky byly přeměřeny pomocí klasického digitálního posuvného měřítka a pro detailnější a přesnější analýzu došlo k přeměření laserových výpalků na dvou 3D souřadnicových měřicích strojích s dotykovým systémem.

Při detailnějším rozboru vyřezaných otvorů v laserových výpalcích se ukázalo, že pro zvolené rozměry vzorku a daný materiál je vhodnější tavné řezání, tedy řezání s využitím dusíku jako asistenčního plynu. Oba systémy polohování jsou při tavném řezání srovnatelné a oba vzorky po vyhodnocení spadají do toleranční třídy přesnosti 1 dle normy ČSN EN 9013.

Volba stroje při sériové výrobě laserových výpalků těchto rozměrů z plechu ČSN 11321 (DC01) tedy závisí na rychlosti výroby, provozních a pořizovacích nákladech samostatného stroje.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ENGST, Pavel a Milan HORÁK. *Aplikace laserů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
2. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser: Řezání laserem. *VUT FSI: Ústav strojírenské technologie* [online]. 2013 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_rezani\\_laserem\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_rezani_laserem_2013_mrna.pdf)
3. Technologie řezání laserem. In: *Deposit photos* [online]. scanrail, 6.9.2015 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://cz.depositphotos.com/82849340/stock-photo-laser-cutting-technology.html>
4. KOŘÁN, Pavel. Laserový seriál: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lasery a optika* [online]. 19.2.2013 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
5. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
6. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
7. KACHTÍK, Lukáš. *Lasery: Historie* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/historie.html>
8. KOŘÁN, Pavel. Laserový seriál: Laserové řezání. *Lasery a optika* [online]. 19.2.2013 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
9. Historie laserů. *LasCam* [online]. 25.7.2015 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/historie/>
10. SATTEL, Sam. How do lasers work. *Autodesk* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/how-lasers-work/>
11. SATTEL, Sam. Ruby laser. In: *Autodesk: How do lasers work* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/how-lasers-work/>
12. KOŘÁN, Pavel. Laserový seriál: Základní princip laseru a jejich dělení. *Lasery a optika* [online]. 19.2.2013 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
13. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser: Základy laserové techniky. *VUT FSI: Ústav strojírenské technologie* [online]. 2013 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_zaklady\\_laserove\\_techiky\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf)
14. WILSON, J a J.F.B HAWKES. *Lasers principles and applications*. New York: Prentice Hall, 1987, 308 s. ISBN 0-13-523705-X.
15. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Lasery: Emise a absorpce světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
16. Technologie a trendy: Rozdělení laserů. *LasCam* [online]. 2.8.2015 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
17. Možné dělení typů a druhů laserů. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>

18. Denní a noční vidění síťových kamer: Jak vnímáme světlo. *NetCam* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/denni-a-nocni-videni.php>
19. DULEY Walter W. *Laser welding*, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.
20. KANNATEY-ASIBU, E. *Principles of Materials Processing*, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.
21. KUSALA, Jaroslav. Aplikace laserů: Průmysl. *ČEZ: Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k31.htm>
22. KUSALA, Jaroslav. Aplikace laserů: Medicína. *ČEZ: Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k32.htm>
23. KUSALA, Jaroslav. Aplikace laserů: Hologramy. *ČEZ: Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k33.htm>
24. KUSALA, Jaroslav. Aplikace laserů: Další oblasti. *ČEZ: Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k34.htm>
25. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser: Svařování laserem. *VUT FSI: Ústav strojírenské technologie* [online]. 2013 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_laserem\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf)
26. KOŘÁN, Pavel. Laserový seriál: Laserové svařování. *Lasery a optika* [online]. 18.2.2013 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laserwelding-134>
27. Technical information: Laser processing: CO2 laser. *Icon machine tool* [online]. 2007 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://iconmachinetool.com/education/Library\\_Laser\\_CO2\\_Laser.pdf](http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf)
28. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění - 5. díl. *MM spektrum* [online]. 12.5.2008 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-5-dil.html>
29. Produkty: Systémy pro laserové čištění. *LasCam* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/produkty/systemy-pro-laserove-cisteni/>
30. O čištění. *Laserové čištění* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://laserove-cisteni.cz/o-cisteni/>
31. JEDELSKÝ, J., P. NĚMEC, D. VESELÝ a P. KALENDA. Povrchová úprava materiálů pomocí laseru. *MM spektrum* [online]. 13.4.2005 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchova-uprava-materialu-pomoci-laseru.html>
32. TŮMA, Martin. Koleje laserem leštěné. In: *Osel* [online]. 13.1.2015 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://www.osel.cz/7983-koleje-laserem-lestene.html?typ=odpoved&id\\_prispevku=130080](http://www.osel.cz/7983-koleje-laserem-lestene.html?typ=odpoved&id_prispevku=130080)
33. Procesy laserového značení. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/procesy-laseroveho-znaceni>
34. CO2 lasers: The industrial workhorse. *Photonics* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25155>
35. ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM spektrum* [online]. 9.7.2008 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html?fbclid=IwAR3gODNo3u9u8QCFOTcUSHgpLuS6Gaq9vpoZxeOVlmtfNV8lGL8J4dXaGSc>



36. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM spektrum* [online]. 4.9.2012 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html?fbclid=IwAR0ajLUVZEJ8rtEDBTUQvaviz4USB7v7Drlds6HCCBh0\\_ULUDYKUekXOMZk](https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html?fbclid=IwAR0ajLUVZEJ8rtEDBTUQvaviz4USB7v7Drlds6HCCBh0_ULUDYKUekXOMZk)
37. DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Mega blog* [online]. 28.2.2013 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/?fbclid=IwAR0Y-1qf2yVDZuEOAtt1ITFAA8vLeSgJhmT7\\_Y2xVtXRipzfNrEKKmhiM3w](https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/?fbclid=IwAR0Y-1qf2yVDZuEOAtt1ITFAA8vLeSgJhmT7_Y2xVtXRipzfNrEKKmhiM3w)
38. Micron laser overview. *II-VI Infrared* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.iiviiinfrared.com/1-Micron-Optics-Materials/1micron-laser-overview.html>
39. Technologie a trendy: Základní rozdělení laserového řezání. *LasCam* [online]. 6.3.2017 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/zakladni-rozdeleni-laseroveho-rezani/>
40. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
41. LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [https://old.zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/Zaklady\\_stavby.pdf?fbclid=IwAR0vIBt\\_unZ1MMxCDW\\_EJxU9LuNx1508VDcYexQLXrAJCK6y\\_bhpaa2EjVw](https://old.zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/Zaklady_stavby.pdf?fbclid=IwAR0vIBt_unZ1MMxCDW_EJxU9LuNx1508VDcYexQLXrAJCK6y_bhpaa2EjVw).  
Západočeská univerzita: Fakulta strojní: Katedra konstruování strojů.
42. KELLER, Petr. *Programování a řízení CNC strojů* [online]. Liberec, 2005 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [http://www.kvs.tul.cz/download/cnc\\_cadcam/pnc\\_2.pdf?fbclid=IwAR1gv73zcUUW4c7H\\_XAseHr9RN9qe93Vj9uD3ItQUVLYcJ-ORGKte6O9I0o](http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf?fbclid=IwAR1gv73zcUUW4c7H_XAseHr9RN9qe93Vj9uD3ItQUVLYcJ-ORGKte6O9I0o).  
Technická univerzita Liberec: Fakulta strojní: Katedra výrobních systémů.
43. KURKA, Jiří. Obráběcí stroje a technologie: Řídicí systémy, pohony a motory pro obráběcí stroje. *MM spektrum* [online]. 17.5.2006 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [https://www.mmspektrum.com/clanek/ridici-systemy-pohony-a-motory-pro-obrabeci-stroje.html?fbclid=IwAR1K4zhwaclrByaB-\\_6V3\\_KC3BfmEuyJJQqS8Vw9jgjjqSW1Q3VcTxWTNkU](https://www.mmspektrum.com/clanek/ridici-systemy-pohony-a-motory-pro-obrabeci-stroje.html?fbclid=IwAR1K4zhwaclrByaB-_6V3_KC3BfmEuyJJQqS8Vw9jgjjqSW1Q3VcTxWTNkU)
44. CNC laserové stroje: Phoenix FL. In: *New tech* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.newtech.cz/lvd-stroje-na-zpracovani-plechu/laserove/phoenix-fl/>
45. Rack and Pinion Program: Catalog racks and pinions. In: *Güdel: Picture park* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://gudel.picturepark.com/Website/Download.aspx?DownloadToken=f047697e-6189-46cb-b78d-cd0cf3b749a3&Purpose=AssetManager&mime-type=application/pdf>
46. KAVÁN, Martin. *Interní materiály firmy Hiwin s.r.o. (obchodní značka FeiCut): Lineární motory*. 2016.
47. ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE\\_FINAL.pdf?fbclid=IwAR1gv73zcUUW4c7H\\_XAseHr9RN9qe93Vj9uD3ItQUVLYcJ-ORGKte6O9I0o](http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf?fbclid=IwAR1gv73zcUUW4c7H_XAseHr9RN9qe93Vj9uD3ItQUVLYcJ-ORGKte6O9I0o).  
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: Fakulta strojní: Katedra obrábění a montáže.

48. NENÁHLO, Čeněk. Měření ve strojírenství Metrologie/ kontrola jakosti: Souřadnicová měřicí technika. *MM spektrum* [online]. 16.3.2011 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicova-merici-technika.html>
49. Hexagon Acquires 3D Measuring Systems Firm AICON. *M & A Navigator* [online]. Normans Media, 2016 [cit. 2019-05-06].
50. Gom: Optimized the production processes with ATOS Triple Scan system. *Maschinen markt* [online]. 12.11.2016 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.maschinenmarkt.it/en/gom-optimized-the-production-processes-with-atos-triple-scan-system/>
51. Produkty: Zakázkové kalibry. In: *Mea systems* [online]. 2014 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [http://www.measystems.cz/produkty\\_zakazkove\\_kalibry.html?fbclid=IwAR13JcNFAo1k16WTPgFuZl36Reza0FHxWggfURuzE-mzs3cH79Wth4d5zdE](http://www.measystems.cz/produkty_zakazkove_kalibry.html?fbclid=IwAR13JcNFAo1k16WTPgFuZl36Reza0FHxWggfURuzE-mzs3cH79Wth4d5zdE)
52. Ocel. *Alfun: Metal service center* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [http://www.alfun.cz/ocel?fbclid=IwAR0eh7qlb7b5j8LMw8Ix7Rj4exLO-xqA3xZfflxiYy\\_1sOh3o6rShdSH5G4](http://www.alfun.cz/ocel?fbclid=IwAR0eh7qlb7b5j8LMw8Ix7Rj4exLO-xqA3xZfflxiYy_1sOh3o6rShdSH5G4)
53. Řezání laserem. *Aquadem s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://aquadem.cz/rezani-laserem/>
54. Laser cutting systems: Introducing BySprint Fiber with 6kW Fiber laser. In: *Bystronic* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [https://www.bystronicusa.com/en/news/media-releases/archive-2014/140501\\_BySprint-Fiber-with-6kW-Fiber-laser.php](https://www.bystronicusa.com/en/news/media-releases/archive-2014/140501_BySprint-Fiber-with-6kW-Fiber-laser.php)
55. Novinky LasCam: Vysokorychlostní řezací stroj a šasi řezacího laseru FeiCut za výhodnou cenu!. In: *LasCam* [online]. 15.6.2018 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/vysokorychlostni-rezaci-stroj-sasi-rezaciho-laseru-feicut-za-vyhodnou-cenu/>
56. Technologie: 3D měření. *AKC - Production* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [http://www.akc-production.cz/technologie/3d-mereni?fbclid=IwAR3HoNsE\\_-0FU0uc6k5tvpKvja4y6QdtW0LVIYhcOgMgHOHOd\\_pAgmywris](http://www.akc-production.cz/technologie/3d-mereni?fbclid=IwAR3HoNsE_-0FU0uc6k5tvpKvja4y6QdtW0LVIYhcOgMgHOHOd_pAgmywris)
57. 3D měření - Měřicí CNC systém. *Aquadem s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://aquadem.cz/3d-mereni/>
58. Macchine di misura: DEA Global Silver Performance 9.20.8. In: *3D Control* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <http://www.3dcontrol.pl/it/sprzet/>
59. Technické kreslení: Geometrické tolerance. *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2.6.2014 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: [https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance?fbclid=IwAR0GfozpHHChdwIXFvE87REqmDxY67bmKQDwOqutjZILv9yBc-qcd\\_zbkIE](https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance?fbclid=IwAR0GfozpHHChdwIXFvE87REqmDxY67bmKQDwOqutjZILv9yBc-qcd_zbkIE)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Legenda	Jednotka
ATOS	Advanced Topometric Senzor (Pokročilý topometrický snímač)	[-]
CNC	Computer numerical control (Počítačové číslicové řízení)	[-]
CW	Continuous waves (kontinuální režim)	[-]
ČSN	Česká technická norma	[-]
DC	Direct current (Buzení elektrickým výbojem)	[-]
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Přímé kovové laserové slinování)	[-]
DPSS	Diode pumped solid state (Buzení laserovými diodami)	[-]
EN	Evropská norma	[-]
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)	[-]
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Zesilování světla pomocí stimulované emise záření)	[-]
LPSS	Lamp pumped solid state (Buzení výbojkami)	[-]
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření)	[-]
MPEE	Největší dovolená chyba při měření rozměru	[μm]
MPEP	Největší dovolená chyba snímání	[μm]
MPETHP	Největší dovolená chyba kontaktního snímání	[μm]
NC	Numerical control (Číslicové řízení)	[-]
PW	Pulsní režim	[-]
QS	Impulsní režim	[-]
RF	Radiofrekvenční buzení	[-]
SLA	Stereolitografie	[-]
SLS	Selective Laser Sintering (Selektivní laserové slinování)	[-]
YAG	Yttrium aluminium granát	[-]

Symbol	Legenda	Jednotka
$a_0, b_0, u_0, v_0$	Skutečné rozměry tvaru vzorku při 1. a 2. měření	[mm]
$a_1, b_1, u_1, v_1$	Skutečné rozměry obdélníkového otvoru vzorku při 1. a 2. měření	[mm]
$a_3, b_3, u_3, v_3$	Skutečné rozměry čtvercového otvoru vzorku při 1. a 2. měření	[mm]
$d_1, d_2$	Skutečné rozměry kruhového otvoru se jmenovitým rozměrem 40 mm při 1. a 2. měření	[mm]
$d_{1min}, d_{1max}$	Maximální a minimální skutečný průměr kruhového otvoru 1 při 3. měření	[mm]
$d_{2min}, d_{2max}$	Maximální a minimální skutečný průměr kruhového otvoru 2 při 3. měření	[mm]
$d_3, d_4$	Skutečné rozměry kruhového otvoru se jmenovitým rozměrem 20 mm při 1. a 2. měření	[mm]
$d_{3min}, d_{3max}$	Maximální a minimální skutečný průměr kruhového otvoru 3 při 3. měření	[mm]
$d_5, d_6$	Skutečné rozměry kruhového otvoru se jmenovitým rozměrem 10 mm při 1. a 2. měření	[mm]
$d_m$	Průměr šroubu	[mm]
$D_1, D_2$	Průměr ohniska	[mm]
$E_1$	Hodnota horní energetické hladiny	[J]
$E_2$	Hodnota dolní energetické hladiny	[J]
$f.N$	Třecí síla	[N]
$F$	Síla od posuvu	[N]
I-N	Vzorek vyřezaný na stroji Bystronic BySprint Fiber 3015 metodou tavného řezání	[-]
II-N	Vzorek vyřezaný na stroji FeiCut FCL 3015/5000W metodou tavného řezání	[-]
I-O	Vzorek vyřezaný na stroji Bystronic BySprint Fiber 3015 metodou oxidačního řezání	[-]
II-O	Vzorek vyřezaný na stroji FeiCut FCL 3015/5000W metodou oxidačního řezání	[-]
$l$	Stoupání na otáčku	[mm]
$L_1, L_2$	Hloubka ostrosti	[mm]
$N$	Normálová síla	[N]
$P_R$	Síla od motoru	[N]
$t$	Hodnota tolerance	[mm]
$\lambda$	Úhel stoupání	[°]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Laserové řezání plechů na CNC dělicích centrech [3] .....	9
Obr. 2 Vzorek z hlubokotažné nelegované oceli ČSN 11321 (DC 01).....	10
Obr. 3 Rubínový laser (optický maser) [11].....	11
Obr. 4 Obecné schéma laseru [12] .....	12
Obr. 5 Vznik laserového svazku (proudu fotonů) [12] .....	12
Obr. 6 Proces stimulované emise [12].....	13
Obr. 7 Provnání laserového záření a žárovky [15].....	13
Obr. 8 Světelné spektrum [18] .....	14
Obr. 9 Režimy laseru [5] .....	15
Obr. 10 Grafické porovnání metod svařování laserem [26] .....	16
Obr. 11 Princip čištění kolejnic [32] .....	17
Obr. 12 Princip laserového gravírování a značení kovů [33] .....	18
Obr. 13 Princip vzniku záření u CO <sub>2</sub> laserů [27] .....	19
Obr. 14 Konstrukce CO <sub>2</sub> laseru s rychlým podélným prouděním [27] .....	20
Obr. 15 Konstrukce CO <sub>2</sub> laseru s příčným prouděním [34] .....	20
Obr. 16 Konstrukce Slab laseru [4] .....	21
Obr. 17 Výbojkami buzený Nd:YAG laser [4] .....	21
Obr. 18 Diodami buzený Nd:YAG laser (zadní buzení) [4].....	22
Obr. 19 Diodami buzený Nd:YAG laser (boční buzení) [4] .....	22
Obr. 20 Princip diskového laseru [38].....	23
Obr. 21 Princip vláknového laseru (fiberu) [4].....	23
Obr. 22 Porovnání pevnolátkových laserů [4] .....	24
Obr. 23 Schéma technologie laserového řezání [8] .....	25
Obr. 24 Graf závislosti řezné rychlosti na tloušťce a druhu řezaného materiálu [2] .....	27
Obr. 25 Poloha ohniska [2] .....	27
Obr. 25a Tavné řezání [2] .....	27
Obr. 25b Oxidační a sublimační řezání [2].....	27
Obr. 26 Vliv ohniskové vzdálenosti na průměr ohniska a hloubku ostrosti [2] .....	28
Obr. 27 CNC dělicí centrum portálového typu [44].....	28
Obr. 28 Rozložení sil u typu pohybového šroubu s otáčející i posouvající maticí [40].....	30
Obr. 29a Pohybový šroub s trapézovým závitem [41] .....	30
Obr. 29b Kuličkový šroub [41] .....	30
Obr. 30a Přímé ozubení [45].....	31
Obr. 30b Šikmé ozubení [45].....	31
Obr. 31 Rozdíl mezi rotačním a lineárním motorem [46] .....	31
Obr. 31a Rotační motor [46].....	31
Obr. 31b Lineární motor [46].....	31
Obr. 32 Přímý pohon s lineárním motorem firmy FeiCut [46].....	33
Obr. 33 Specilání měřicí kalibry [51].....	33
Obr. 33a Válcové [51] .....	33
Obr. 33b Oválné [51].....	33
Obr. 33c Čtvercový [51].....	33
Obr. 34 3D měřicí souřadnicový stroj s dotykovým snímacím systémem [48] .....	34
Obr. 35 Optický 3D skener ATOS Triple Scan [50].....	34
Obr. 36 Model laserového výpalku v Inventoru (viz příloha 1) .....	35
Obr. 37 Bystronic BySprint Fiber 3015 s automatizací ByTrans [54].....	36
Obr. 38 FeiCut FCL 3015 [55] .....	36
Obr. 39 Digitální posuvné měřítko Mitutoyo .....	37

Obr. 40 Třísouřadnicový měřicí stroj DEA Global Silver Performance 09.20.08 [56] .....	37
Obr. 41 Třísouřadnicový měřicí stroj DEA Global Silver Classic 09.20.08 [58].....	38
Obr. 42 Nákres vyřezaného vzorku pro 1. a 2. měření.....	38
Obr. 43 Nákres vyřezaného vzorku pro 3. měření .....	39
Obr. 44 Geometrické tolerance [59].....	40
Obr. 44a Přímost [59].....	40
Obr. 44b Kruhovitost [59] .....	40
Obr. 45 Dělení materiálu na CNC dělicím centru Bytronic BySprint Fiber 3015.....	43



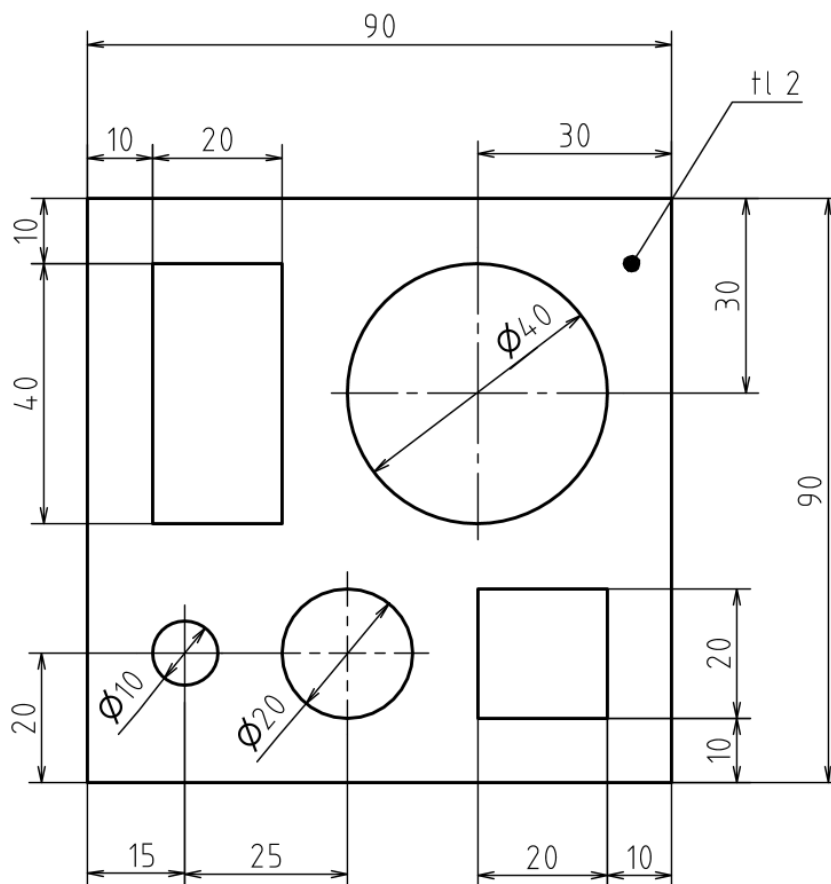
## SEZNAM TABULEK


Tab. 1 Přehled naměřené hodnot digitálním posuvným měřátkem Mitutoyo .....	39
Tab. 2 Přehled naměřených hodnot 3D měřícím strojem DEA Global Silver Performance 09.20.08 (viz příloha 2, 3, 4 a 5) .....	39
Tab. 3 Přehled naměřených hodnot kruhových otvorů 3D měřícím strojem DEA Global Classic 09.20.08 (viz příloha 6, 7, 8 a 9) .....	40
Tab. 4 Přehled naměřených hodnot čtyřúhelníkových otvorů 3D měřícím strojem DEA Global Silver Classic 09.20.08 (viz příloha 6, 7, 8 a 9).....	40
Tab. 5 Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů vzorku I-O a zařazení do příslušných tolerančních tříd (viz příloha 10) .....	41
Tab. 6 Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů vzorku I-N a zařazení do příslušných tolerančních tříd (viz příloha 10) .....	41
Tab. 7 Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů vzorku II-O a zařazení do příslušných tolerančních tříd (viz příloha 10) .....	42
Tab. 8 Výpočet maximálních výchylek jmenovitých rozměrů vzorku II-N a zařazení do příslušných tolerančních tříd (viz příloha 10) .....	42

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výkres zadaného vzorku v Inventoru
- Příloha 2 Atest materiálu ČSN 11321 DC01 o tloušťce 2 mm
- Příloha 3 Měření vzorku I-O na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Silver Performance 09.20.08
- Příloha 4 Měření vzorku I-N na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Silver Performance 09.20.08
- Příloha 5 Měření vzorku II-O na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Silver Performance 09.20.08
- Příloha 6 Měření vzorku II-N na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Silver Performance 09.20.08
- Příloha 7 Měření vzorku I-O na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Silver Classic 09.20.08
- Příloha 8 Měření vzorku I-N na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Silver Classic 09.20.08
- Příloha 9 Měření vzorku II-O na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Silver Classic 09.20.08
- Příloha 10 Měření vzorku II-N na 3D souřadnicovém měřicím stroji DEA Global Silver Classic 09.20.08
- Příloha 11 Norma ČSN EN ISO 9013 (rozměrové úchytky)

# Příloha č. 1



Struktura povrchu		Hrany		Měřítko	Přesnost ISO 2768-mK
				1:1	Tolerování ISO 8015
					Promítání 
Materiál ČSN 11 321	Polotovary 90x90x2			Hmotnost 0,082kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
	Druh dokumentu VÝKRES			Název  LASEROVÝ VÝPALEK	
	Kreslil PETRUŠKA				
	Schválil			Číslo dokumentu  1	
	Datum vydání 15.5.2018				
List 1 / 1					

# Příloha č. 2

03. 04. 2018 10:22:13  
M-2018-166

AQUADEM, S.R.O.  
TOVÁRNÍ 1  
BRNO-CHRLICE  
643 00

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Feron, a.s. Původní materiál byl přepracován na rozměry uvedené v dodacím listu. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem na základě těchto údajů: jednoznačný údaj pro přiřazení č. 491796101 KS Ferony č. 355104 DL č. 18/62/09679760 objednávka zákazníka č. OV18-1004 na množství 864 KG.

Test report according to EN 10204-2.2

A02

U.S.Steel Košice, s.r.o. Vstupný areál U.S.Steel 044 54 Košice SLOVAK REPUBLIC	Purchaser Art. No: 728SB5I7/09C Works Order No: XD7C0773 Advice No: 17/405377 01 Your order: 620117/2	A09 A08 A10 A07 Feron, a.s. Polygrafická 3 108 33 PRAHA 10 Česká republika
METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 17/405377 01	A03	B09
Desc. of goods: COLD ROLLED STEEL COILS	B01	Size: 2,000 x 1500,0 mm EN 10131/06
Standard: EN 10130/06	B02	B03
Quality: DC01 Am	B02	Delivery Note: 71613302 A10
Unit No	Coil No	Heat
491796101	4917961	49179
Unit No	Coil No	Heat
491796102	4917961	49179

## MECHANICAL TEST RESULTS

		Coil No	
Min. / Max.		4917961	
C11 Rp0,2 C03 +20°C(T)	(MPa)	/280	182
C12 Rm C03 +20°C(T)	(MPa)	270/410	322
C13 A80 C03 +20°C(T)	(% )	28,0/	42,0
C02 Direction: (T)-transversal;			

C71

## CHEMICAL COMPOSITION, %

		Heat No	
Min. / Max.		49179	
C	/0,12	0,04	
P	/0,045	0,010	
Mn	/0,60	0,27	
S	/0,045	0,013	

THE MATERIAL IS IN COMPLIANCE WITH ORDER REQUIREMENTS. Z01				352	Last Page: 1
The measured weight-based activity of Co60 + Cs137 + Am241 radionuclide is not higher than 100 Bq/kg. D02				F-USM/0063-04/10-01-12	
Z04	Z05	Z02	Z03		
www.usske.sk		U. S. Steel Košice, s.r.o. 02 Vstupný areál U. S. STEEL Odbor Analýzy kvality a špecifikácie Uvoľňovanie výrodkov a Hručné atesty 044 54 Košice			
Košice: 28.12.2017, 7:31:41 JOZEF ČERVENÁK, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE. e-mail: jcervenak@sk.uss.com, tel.: +421-55-6737464 DARINA BERNÁTOVÁ, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE. e-mail: dbernato@sk.uss.com, tel.: +421-55-6732373					

Z02

# Příloha č. 3

**SIEMENS**

Siemens s.r.o.  
o.z. Mohelnice

**ADVANTAGE 12.22.10**



DATE=23.3.2018                      TIME=10:52:30  
PART NAME : Zkušební etalon  
REV NUMBER :  
SER NUMBER :  
STATS COUNT : 1

Kus č. : 0 - 1

DIM A0= 2D DISTANCE FROM LINE CTV0\_B TO LINE CTV0\_D PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        90.009  
DIM B0= 2D DISTANCE FROM LINE CTV0\_A TO LINE CTV0\_C PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        90.021  
DIM V0= 2D DISTANCE FROM POINT BO\_3 TO POINT BO\_1            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        127.288  
DIM U0= 2D DISTANCE FROM POINT BO\_4 TO POINT BO\_2            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        127.312  
DIM A1\_ = 2D DISTANCE FROM LINE LIN10 TO LINE LIN12 PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        19.977  
DIM B1= 2D DISTANCE FROM LINE LIN13 TO LINE LIN11 PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        39.993  
DIM U1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT11 TO POINT PNT9            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        44.689  
DIM V1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT10 TO POINT PNT8            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        44.719  
DIM A3= 2D DISTANCE FROM LINE CTV1\_A TO LINE CTV1\_C PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        19.970  
DIM B3= 2D DISTANCE FROM LINE CTV1\_B TO LINE CTV1\_D PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        19.977  
DIM U3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT7 TO POINT PNT5            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        28.247  
DIM V3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT6 TO POINT PNT4            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        28.245  
DIM PRŮMĚR 40= LOCATION OF CIRCLE CIR2    UNITS=MM  
AX        MEAS  
D        39.982  
DIM D1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT12 TO POINT PNT14 PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        39.982  
DIM D2= 2D DISTANCE FROM POINT PNT13 TO POINT PNT15 PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        39.969

PART NUMBER=Zkušební etalon    DATE=23.3.2018    TIME=10:58:44    PAGE#=2

DIM PRŮMĚR 20= LOCATION OF CIRCLE CIR1    UNITS=MM  
AX        MEAS  
D        19.976  
DIM D3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT16 TO POINT PNT18 PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        19.970  
DIM D4= 2D DISTANCE FROM POINT PNT17 TO POINT PNT19 PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        19.955  
DIM PRŮMĚR 15= LOCATION OF CIRCLE CIR3    UNITS=MM  
AX        MEAS  
D        9.974  
DIM D5= 2D DISTANCE FROM POINT PNT20 TO POINT PNT22 PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        9.945  
DIM D6= 2D DISTANCE FROM POINT PNT21 TO POINT PNT23 PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS    UNITS=MM  
AX        MEAS  
M        9.977

END OF MEASUREMENT

# Příloha č. 4

**SIEMENS**

Siemens s.r.o.  
o.z. Mohelnice

**ADVANTAGE 12.22.10**



DATE=23.3.2018                      TIME=10:28:42  
PART NAME : Zkušební etalon  
REV NUMBER :  
SER NUMBER :  
STATS COUNT : 1

Kus č. : N - 1

DIM A0= 2D DISTANCE FROM LINE CTV0\_B TO LINE CTV0\_D PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       90.033  
DIM B0= 2D DISTANCE FROM LINE CTV0\_A TO LINE CTV0\_C PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       90.054  
DIM V0= 2D DISTANCE FROM POINT BO\_3 TO POINT BO\_1            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       127.332  
DIM U0= 2D DISTANCE FROM POINT BO\_4 TO POINT BO\_2            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       127.351  
DIM A1\_ = 2D DISTANCE FROM LINE LIN10 TO LINE LIN12 PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       20.020  
DIM B1= 2D DISTANCE FROM LINE LIN13 TO LINE LIN11 PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       40.015  
DIM U1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT11 TO POINT PNT9            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       44.740  
DIM V1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT10 TO POINT PNT8            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       44.748  
DIM A3= 2D DISTANCE FROM LINE CTV1\_A TO LINE CTV1\_C PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       19.999  
DIM B3= 2D DISTANCE FROM LINE CTV1\_B TO LINE CTV1\_D PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       20.003  
DIM U3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT7 TO POINT PNT5            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       28.285  
DIM V3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT6 TO POINT PNT4            (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       28.287  
DIM PRŮMĚR 40= LOCATION OF CIRCLE CIR2   UNITS=MM  
AX       MEAS  
D       39.998  
DIM D1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT12 TO POINT PNT14 PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       40.015  
DIM D2= 2D DISTANCE FROM POINT PNT13 TO POINT PNT15 PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       40.000

PART NUMBER=Zkušební etalon    DATE=23.3.2018    TIME=10:31:04    PAGE#=2

DIM PRŮMĚR 20= LOCATION OF CIRCLE CIR1   UNITS=MM  
AX       MEAS  
D       20.004  
DIM D3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT16 TO POINT PNT18 PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       20.000  
DIM D4= 2D DISTANCE FROM POINT PNT17 TO POINT PNT19 PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       20.000  
DIM PRŮMĚR 15= LOCATION OF CIRCLE CIR3   UNITS=MM  
AX       MEAS  
D       10.007  
DIM D5= 2D DISTANCE FROM POINT PNT20 TO POINT PNT22 PAR TO    XAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       10.005  
DIM D6= 2D DISTANCE FROM POINT PNT21 TO POINT PNT23 PAR TO    YAXIS,NO\_RADIUS   UNITS=MM  
AX       MEAS  
M       9.989

END OF MEASUREMENT



# Příloha č. 5

**SIEMENS**

Siemens s.r.o.  
o.z. Mohelnice

**ADVANTAGE 12.22.10**



DATE=23.3.2018  
PART NAME : Zkušební etalon  
REV NUMBER :  
SER NUMBER :  
STATS COUNT : 1

TIME=11:08:25

Kus č. : 0 - 2

DIM A0= 2D DISTANCE FROM LINE CTV0\_B TO LINE CTV0\_D PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 89.826  
DIM B0= 2D DISTANCE FROM LINE CTV0\_A TO LINE CTV0\_C PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 89.858  
DIM V0= 2D DISTANCE FROM POINT B0\_3 TO POINT B0\_1 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 127.039  
DIM U0= 2D DISTANCE FROM POINT B0\_4 TO POINT B0\_2 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 127.070  
DIM A1\_= 2D DISTANCE FROM LINE LIN10 TO LINE LIN12 PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 20.092  
DIM B1= 2D DISTANCE FROM LINE LIN13 TO LINE LIN11 PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 40.053  
DIM U1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT11 TO POINT PNT9 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 44.822  
DIM V1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT10 TO POINT PNT8 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 44.797  
DIM A3= 2D DISTANCE FROM LINE CTV1\_A TO LINE CTV1\_C PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 20.091  
DIM B3= 2D DISTANCE FROM LINE CTV1\_B TO LINE CTV1\_D PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 20.079  
DIM U3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT7 TO POINT PNT5 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 28.411  
DIM V3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT6 TO POINT PNT4 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 28.398  
DIM PRŮMĚR 40= LOCATION OF CIRCLE CIR2 UNITS=MM  
AX MEAS  
D 40.075  
DIM D1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT12 TO POINT PNT14 PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 40.085  
DIM D2= 2D DISTANCE FROM POINT PNT13 TO POINT PNT15 PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 40.075

PART NUMBER=Zkušební etalon DATE=23.3.2018 TIME=11:19:04 PAGE#=2

DIM PRŮMĚR 20= LOCATION OF CIRCLE CIR1 UNITS=MM  
AX MEAS  
D 20.083  
DIM D3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT16 TO POINT PNT18 PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 20.083  
DIM D4= 2D DISTANCE FROM POINT PNT17 TO POINT PNT19 PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 20.079  
DIM PRŮMĚR 15= LOCATION OF CIRCLE CIR3 UNITS=MM  
AX MEAS  
D 10.095  
DIM D5= 2D DISTANCE FROM POINT PNT20 TO POINT PNT22 PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 10.103  
DIM D6= 2D DISTANCE FROM POINT PNT21 TO POINT PNT23 PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 10.081

END OF MEASUREMENT

# Příloha č. 6

**SIEMENS**

Siemens s.r.o.  
o.z. Mohelnice

**ADVANTAGE 12.22.10**



DATE=23.3.2018 TIME=10:42:18  
PART NAME : Zkušební etalon  
REV NUMBER :  
SER NUMBER :  
STATS COUNT : 1

Kus č. : N - 2

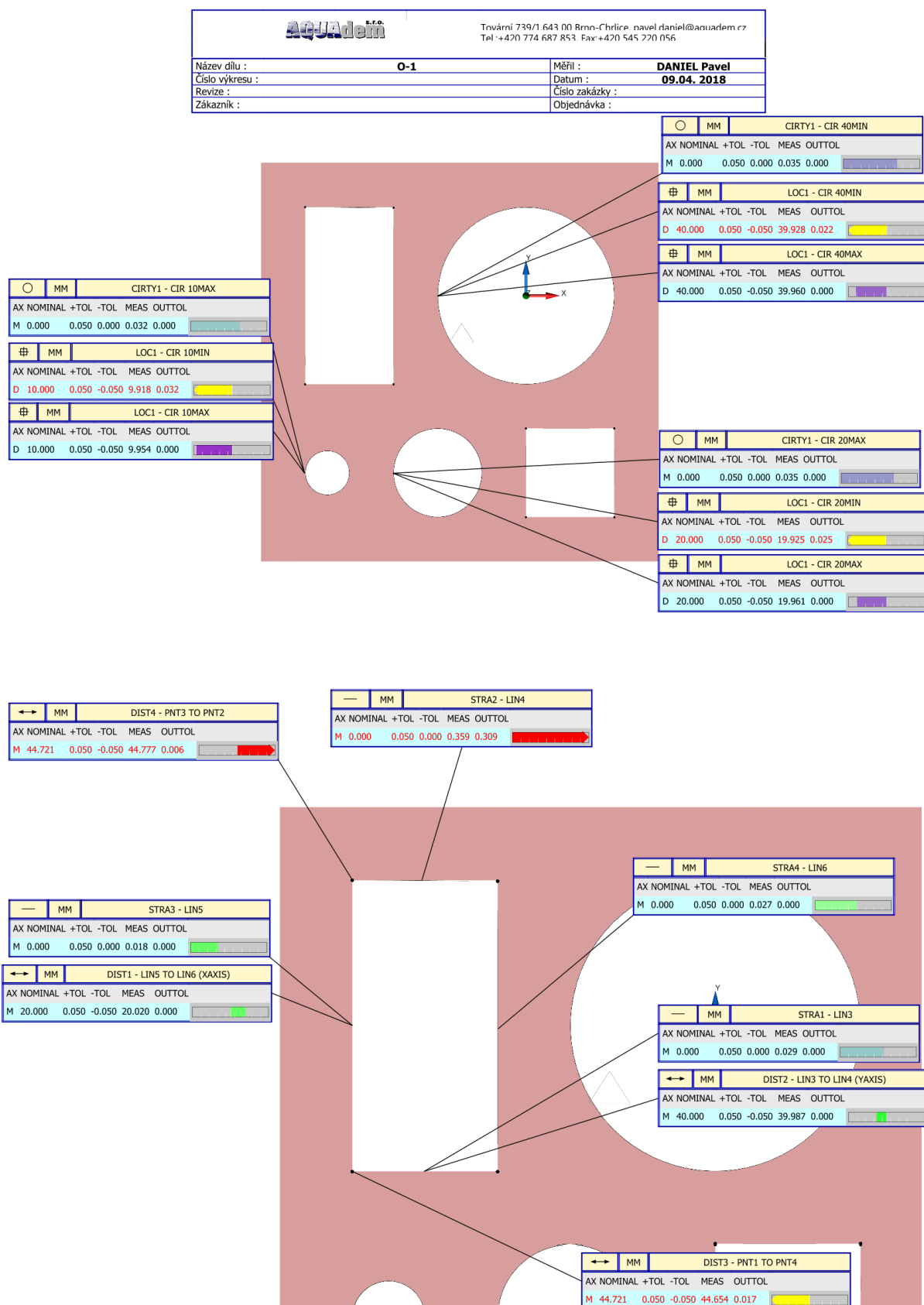
DIM A0= 2D DISTANCE FROM LINE CTV0\_B TO LINE CTV0\_D PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 90.060  
DIM B0= 2D DISTANCE FROM LINE CTV0\_A TO LINE CTV0\_C PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 90.027  
DIM V0= 2D DISTANCE FROM POINT B0\_3 TO POINT B0\_1 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 127.322  
DIM U0= 2D DISTANCE FROM POINT B0\_4 TO POINT B0\_2 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 127.360  
DIM A1\_ = 2D DISTANCE FROM LINE LIN10 TO LINE LIN12 PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 19.959  
DIM B1= 2D DISTANCE FROM LINE LIN13 TO LINE LIN11 PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 39.969  
DIM U1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT11 TO POINT PNT9 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 44.678  
DIM V1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT10 TO POINT PNT8 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 44.671  
DIM A3= 2D DISTANCE FROM LINE CTV1\_A TO LINE CTV1\_C PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 19.959  
DIM B3= 2D DISTANCE FROM LINE CTV1\_B TO LINE CTV1\_D PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 19.956  
DIM U3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT7 TO POINT PNT5 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 28.228  
DIM V3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT6 TO POINT PNT4 (CENTER TO CENTER),NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 28.220  
DIM PRŮMĚR 40= LOCATION OF CIRCLE CIR2 UNITS=MM  
AX MEAS  
D 39.957  
DIM D1= 2D DISTANCE FROM POINT PNT12 TO POINT PNT14 PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 39.980  
DIM D2= 2D DISTANCE FROM POINT PNT13 TO POINT PNT15 PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 39.933

PART NUMBER=Zkušební etalon DATE=23.3.2018 TIME=10:50:29 PAGE#=2

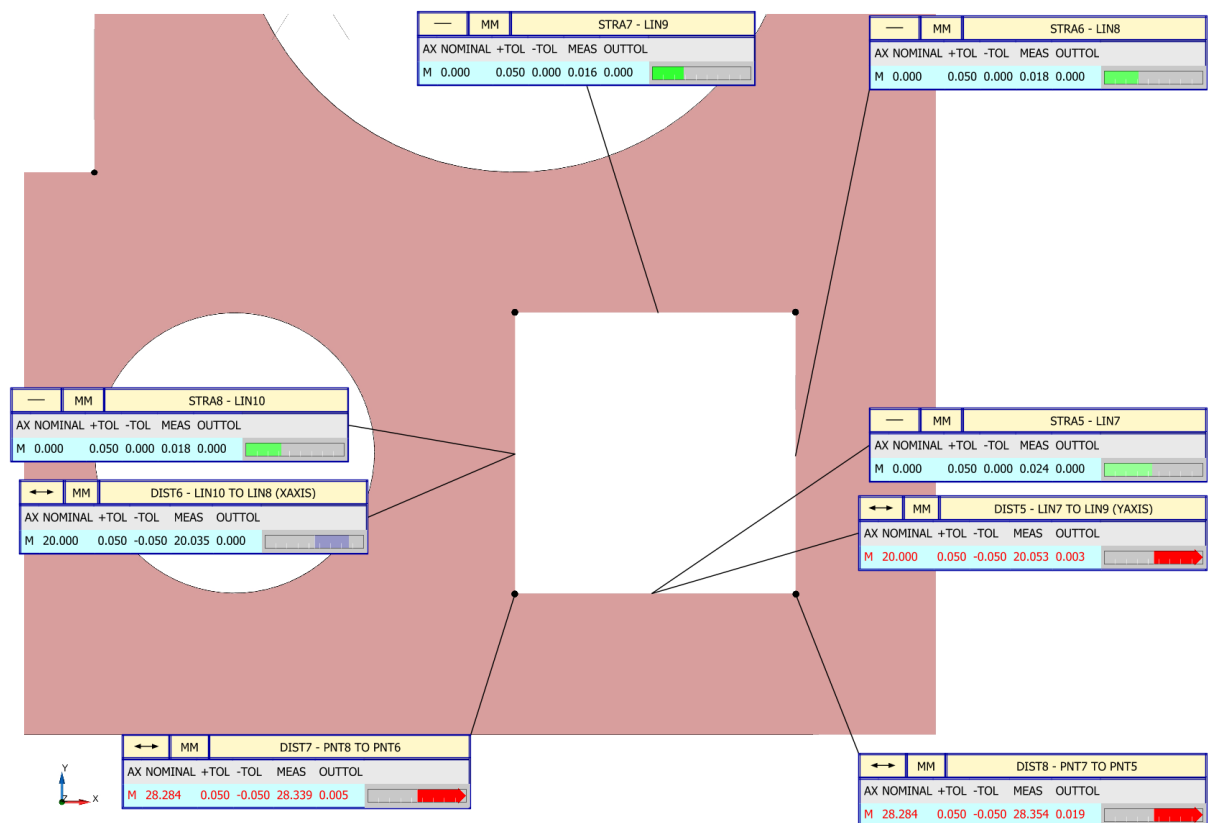
DIM PRŮMĚR 20= LOCATION OF CIRCLE CIR1 UNITS=MM  
AX MEAS  
D 19.952  
DIM D3= 2D DISTANCE FROM POINT PNT16 TO POINT PNT18 PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 19.980  
DIM D4= 2D DISTANCE FROM POINT PNT17 TO POINT PNT19 PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 19.922  
DIM PRŮMĚR 15= LOCATION OF CIRCLE CIR3 UNITS=MM  
AX MEAS  
D 9.962  
DIM D5= 2D DISTANCE FROM POINT PNT20 TO POINT PNT22 PAR TO XAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 9.971  
DIM D6= 2D DISTANCE FROM POINT PNT21 TO POINT PNT23 PAR TO YAXIS,NO\_RADIUS UNITS=MM  
AX MEAS  
M 9.932

END OF MEASUREMENT

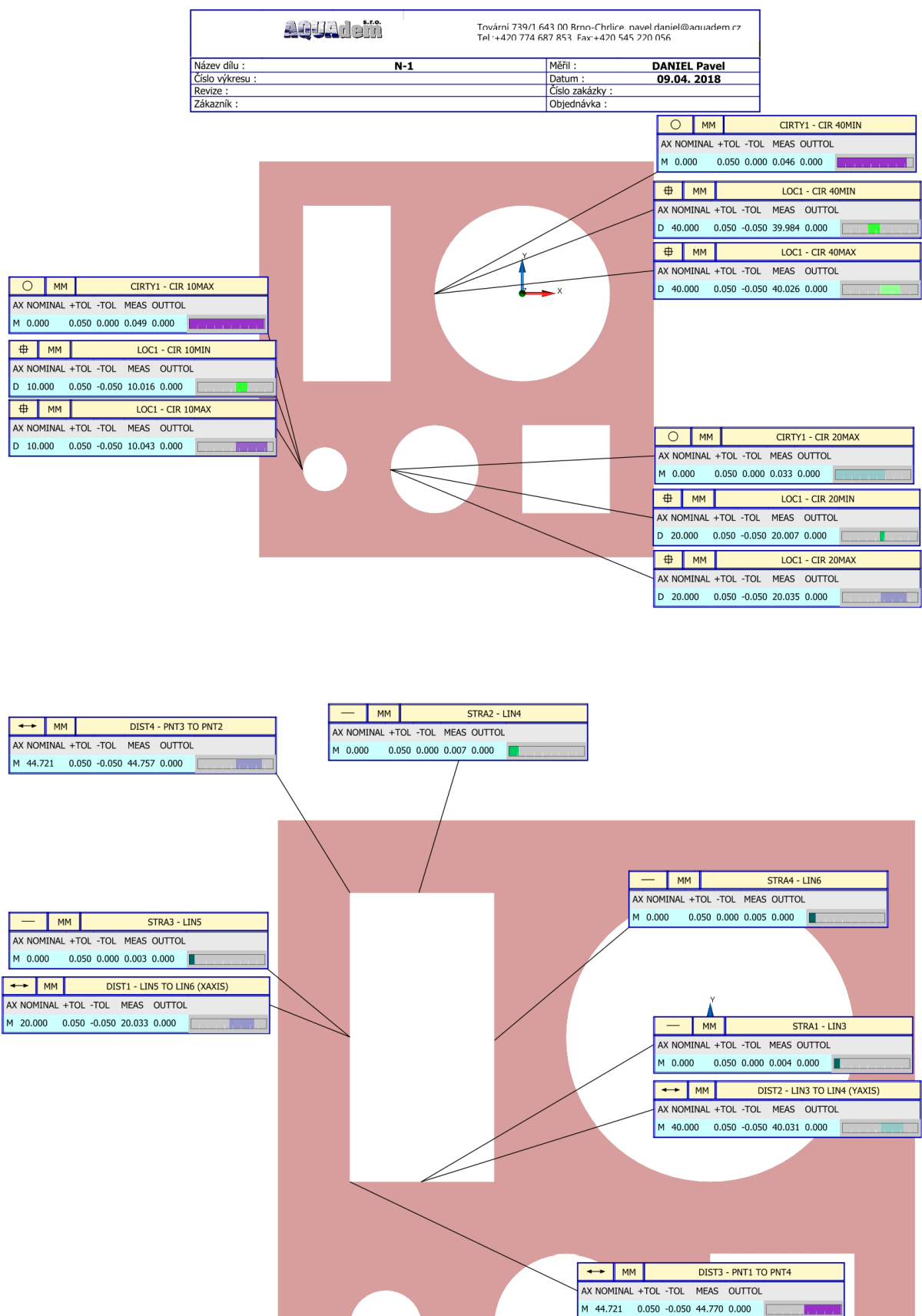
# Příloha č. 7 (1. část)



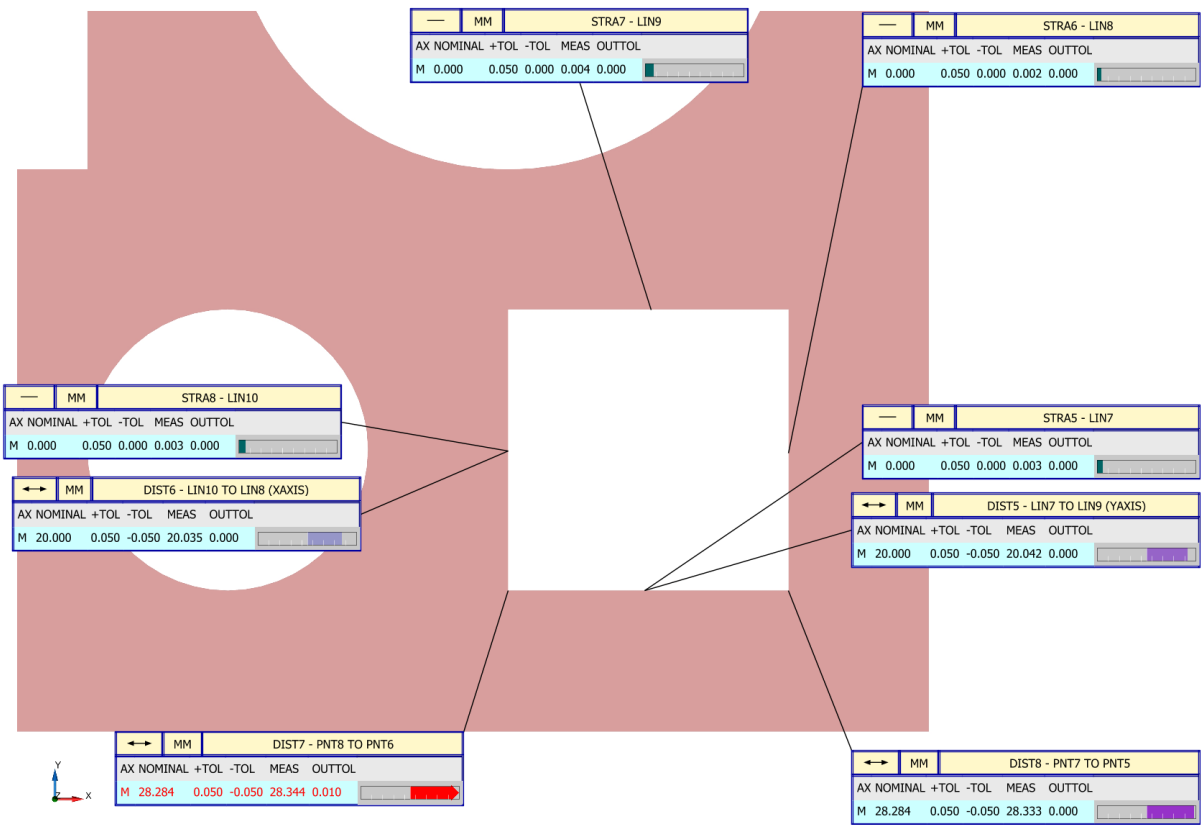
## Příloha č. 7 (2. Část)



# Příloha č. 8 (1. část)

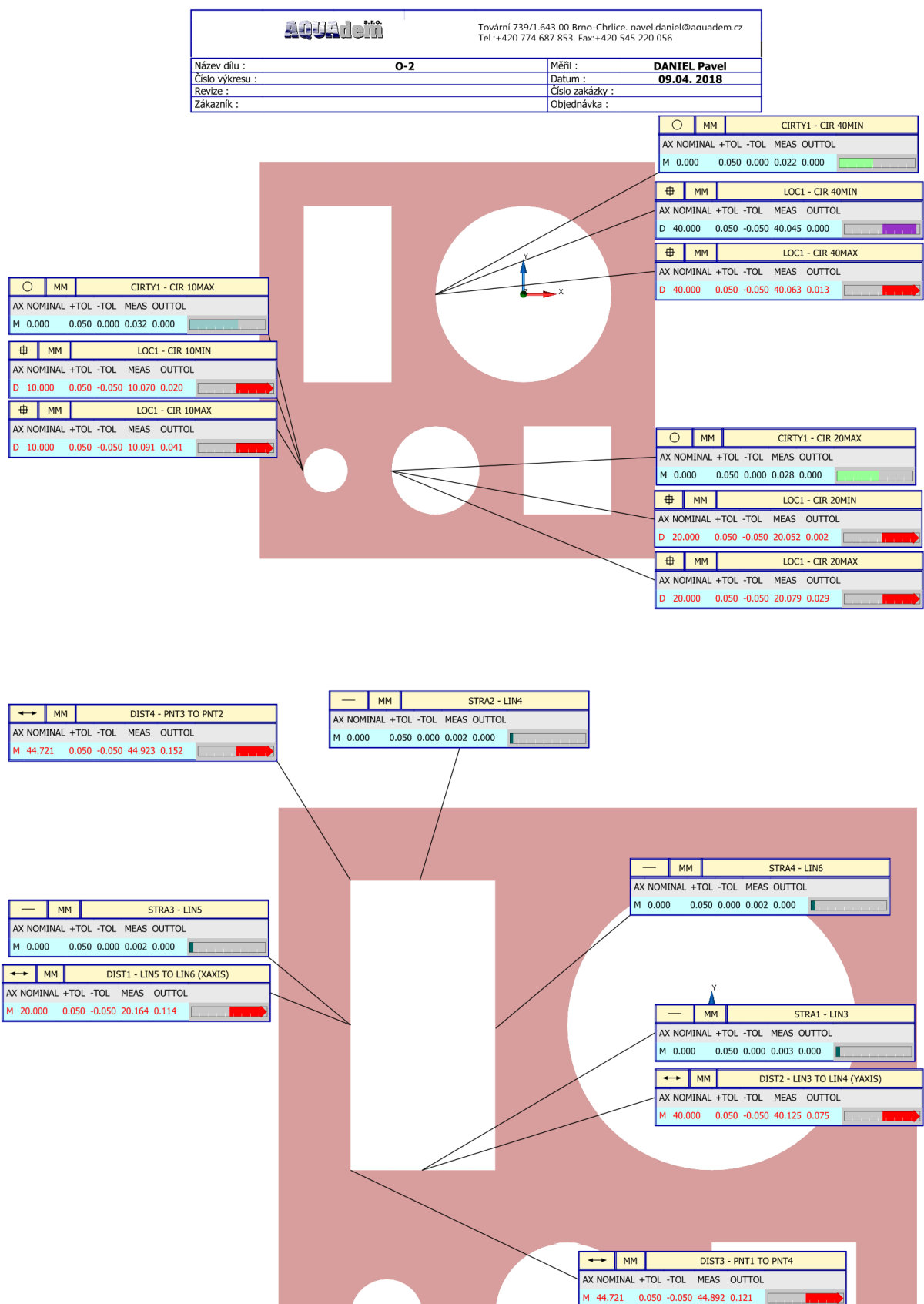


Příloha č. 8 (2. část)

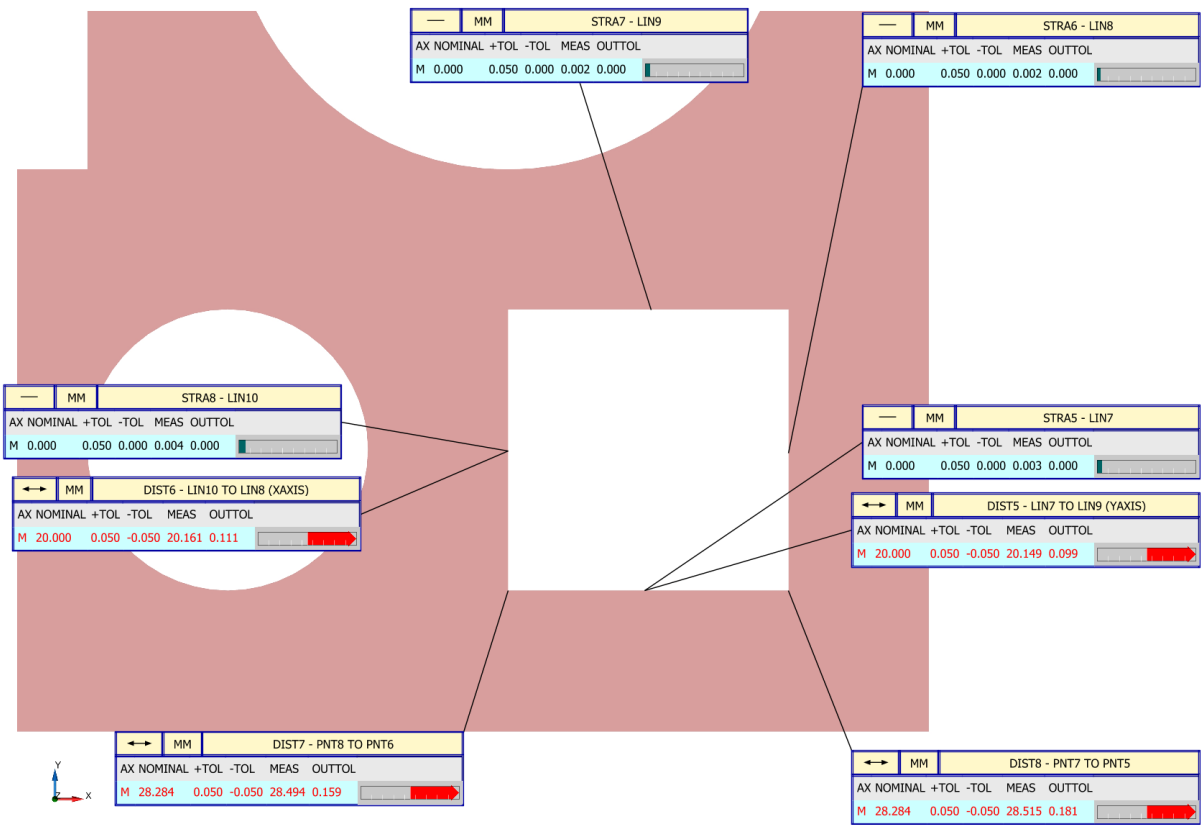





# 



Příloha č. 9 (2. část)



## Příloha č. 10 (1. část)

		Tovární 739/1 643 00 Brno-Chřtice, Pavel Daniel@aquadem.cz Tel. +420 774 687 853, Fax +420 545 220 056	
Název dílu :	<b>N-2</b>	Měříl :	<b>DANIEL PAVEL</b>
Číslo výkresu :		Datum :	<b>09.04.2018</b>
Revize :		Číslo zakázky :	
Zákazník :		Objednávka :	



○	MM	CIRT1Y - CIR 10MAX			
AX NOMINAL		+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
M	0.000	0.050	0.000	0.045	0.000



⊕	MM	LOC1 - CIR 10MIN			
AX NOMINAL		+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
D	10.000	0.050	-0.050	9.949	0.001



⊕	MM	LOC1 - CIR 10MAX			
AX NOMINAL		+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
D	10.000	0.050	-0.050	9.980	0.000

	MM	CIRTY1 - CIR 40MIN				
AX NOMINAL +TOL -TOL MEAS OUTTOL						
M	0.000	0.050	0.000	0.052	0.002	

	MM	LOC1 - CIR 40MIN				
AX NOMINAL +TOL -TOL MEAS OUTTOL						
D	40.000	0.050	-0.050	39.967	0.000	

	MM	LOC1 - CIR 40MAX				
AX NOMINAL +TOL -TOL MEAS OUTTOL						
D	40.000	0.050	-0.050	40.011	0.000	

<input type="radio"/>	MM	CIRTY1 - CIR 20MAX				
AX NOMINAL +TOL -TOL MEAS OUTTOL						
M	0.000	0.050	0.000	0.055	0.005	<div></div>

<input checked="" type="radio"/>	MM	L1C1 - CIR 20MIN				
AX NOMINAL +TOL -TOL MEAS OUTTOL						
D	20.000	0.050	-0.050	19.938	0.012	<div></div>

<input checked="" type="radio"/>	MM	L1C1 - CIR 20MAX				
AX NOMINAL +TOL -TOL MEAS OUTTOL						
D	20.000	0.050	-0.050	19.984	0.000	<div></div>

↔		MM	DIST4 - PNT3 TO PNT2		
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
M	44.721	0.050	-0.050	44.692	0.000

—	MM	STRA2 - LIN4			
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
M	0.000	0.050	0.000	0.002	0.000

—	MM	STRA3 - LIN5			
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
M	0.000	0.050	0.000	0.003	0.000

↔		MM	DIST1 - LIN5 TO LIN6 (XAXIS)			
	AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
M	20.000	0.050	-0.050	19.959	0.000	

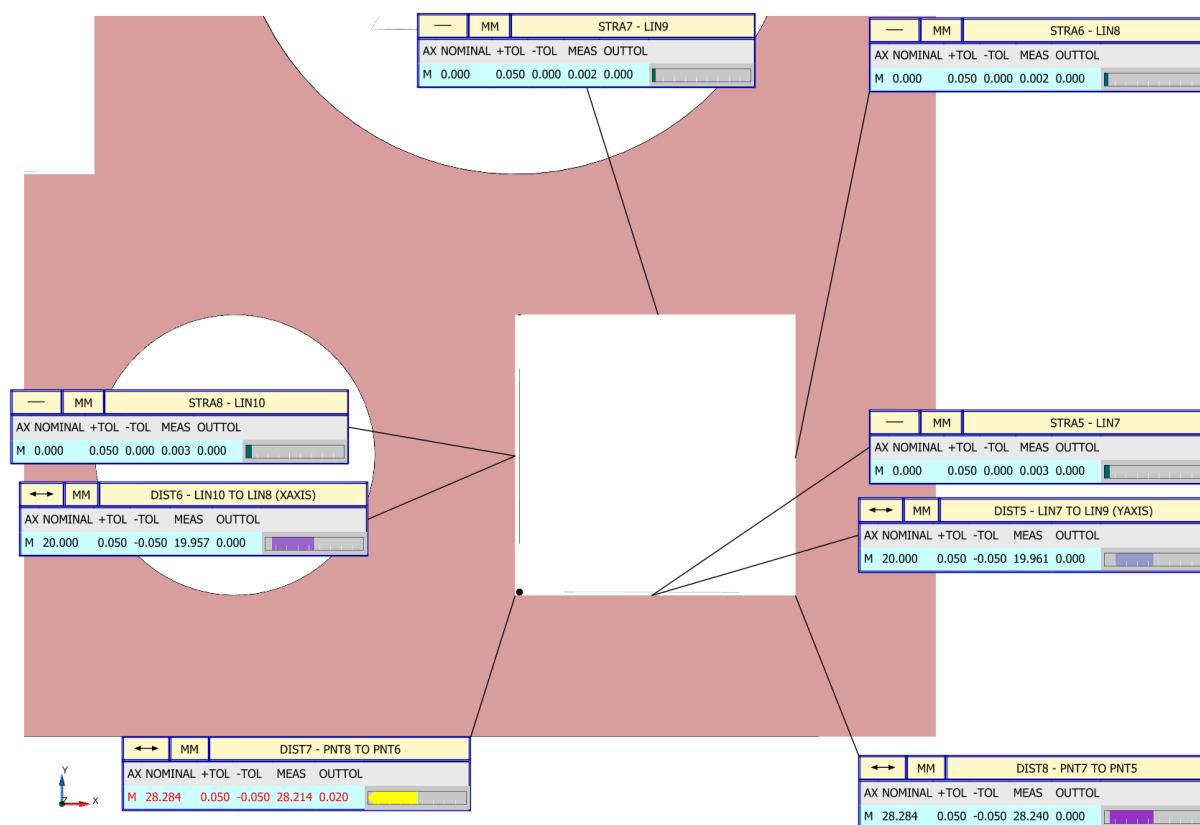
—	MM	STRA4 - LIN6			
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
M	0.000	0.050	0.000	0.002	0.000

—	MM	STRA1 - LIN3
AX NOMINAL	+TOL -TOL	MEAS OUTTOL

AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
M	40.000	0.050	-0.050	39.978	0.000

↔	MM	DIST3 - PNT1 TO PNT4			
AX NOMINAL		+TOL	-TOL	MEAS	OUTTOL
M	44.721	0.050	-0.050	44.677	0.000

## Příloha č. 10 (2. část)



# Příloha č. 11 (1. část)

ČSN EN ISO 9013

Úchyly platí pouze pro řezy provedené plamenem a plazmou. Poměr délky a šířky zpracovávaného kusu nesmí být větší než 4:1 a délka řezu (obvodová) nesmí být menší než 350 mm.

Pro zpracovávaný kus, řezaný plamenem a plazmou s poměrem délky k šířce větším než 4:1 musí být mezní úchyly stanoveny výrobcem v souladu s pravidly, uvedenými v této mezinárodní normě.

Pro řezy provedené laserem závisí dosažitelné úchyly v podstatě na geometrii a předběžné úpravě řezaného materiálu.

Je-li to nutné, musí být mezní úchyly dohodnuty samostatně.

Mezní úchyly pro kvalitu povrchu řezu (úchyly kolmosti nebo úhlové úchyly) jsou posuzovány odděleně od mezních úchylek pro rozměrové úchyly zpracovávaného kusu, aby se zdůraznily různé vlivy na zpracovávaný kus.

Definice pro mezní úchyly jsou založeny na pravidlu nezávislosti, popsaném v normě ISO 8015, podle kterého úchyly rozměrů a úchyly geometrického tvaru a polohy jsou aplikovány nezávisle jedna na druhé. Mezní úchyly rozměrů nezahrnují úchyly kolmosti nebo úhlu.

Vzhledem k tomu, že jsou definice mezních úchylek založeny na pravidlu nezávislosti, má se za to, že není nutné zdůrazňovat tuto skutečnost ještě jednou dodatečným uvedením tolerance podle normy ISO 8015 na výkrese. Takto se vyhneme možným nedorozuměním, pokud jde o možné vyloučení pravidla nezávislosti, v případě, že by nebyl žádný odkaz na normu ISO 8015.

U ostatních úchylek tvaru a polohy, jako je úchylna přímosti, úchylna kolmosti ve směru délky a šířky řezu, musí být dodržováno, že musí být dohodnuty odděleně.

Tabulka 6 – Mezní úchyly jmenovitých rozměrů, toleranční třída 1

Tloušťka řezaného materiálu	Jmenovité rozměry							
	> 0 < 3	≥ 3 < 10	≥ 10 < 35	≥ 35 < 125	≥ 125 < 315	≥ 315 < 1000	≥ 1000 < 2000	≥ 2000 < 4000
	Mezní úchyly							
> 0 ≤ 1	± 0,04	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,3	± 0,3
> 1 ≤ 3,15	± 0,1	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,3	± 0,4	± 0,4	± 0,4
> 3,15 ≤ 6,3	± 0,3	± 0,3	± 0,4	± 0,4	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,6
> 6,3 ≤ 10	-	± 0,5	± 0,6	± 0,6	± 0,7	± 0,7	± 0,7	± 0,8
> 10 ≤ 50	-	± 0,6	± 0,7	± 0,7	± 0,8	± 1	± 1,6	± 2,5
> 50 ≤ 100	-	-	± 1,3	± 1,3	± 1,4	± 1,7	± 2,2	± 3,1
> 100 ≤ 150	-	-	± 1,9	± 2	± 2,1	± 2,3	± 2,9	± 3,8
> 150 ≤ 200	-	-	± 2,6	± 2,7	± 2,7	± 3	± 3,6	± 4,5
> 200 ≤ 250	-	-	-	-	-	± 3,7	± 4,2	± 5,2
> 250 ≤ 300	-	-	-	-	-	± 4,4	± 4,9	± 5,9

# Příloha č. 11 (2. část)

ČSN EN ISO 9013

Tabulka 7 – Mezní úchytky jmenovitých rozměrů, toleranční třída 2

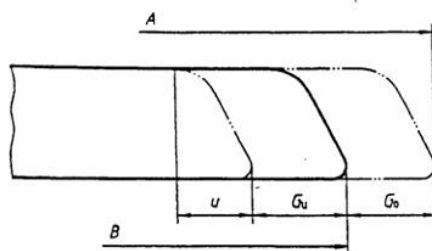
Rozměry v mm

Tloušťka řezaného materiálu	Jmenovité rozměry							
	> 0 < 3	≥ 3 < 10	≥ 10 < 35	≥ 35 < 125	≥ 125 < 315	≥ 315 < 1000	≥ 1000 < 2000	≥ 2000 < 4000
	Mezní úchytky							
> 0 ≤ 1	± 0,1	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 0,9
> 1 ≤ 3,15	± 0,2	± 0,4	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 1	± 1,1
> 3,15 ≤ 6,3	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 1,1	± 1,2	± 1,3	± 1,3
> 6,3 ≤ 10	-	± 1	± 1,1	± 1,3	± 1,4	± 1,5	± 1,6	± 1,7
> 10 ≤ 50	-	± 1,8	± 1,8	± 1,8	± 1,9	± 2,3	± 3	± 4,2
> 50 ≤ 100	-	-	± 2,5	± 2,5	± 2,6	± 3	± 3,7	± 4,9
> 100 ≤ 150	-	-	± 3,2	± 3,3	± 3,4	± 3,7	± 4,4	± 5,7
> 150 ≤ 200	-	-	± 4	± 4	± 4,1	± 4,5	± 5,2	± 6,4
> 200 ≤ 250	-	-	-	-	-	± 5,2	± 5,9	± 7,2
> 250 ≤ 300	-	-	-	-	-	± 6	± 6,7	± 7,9

## 8.2 Rozměrové úchytky dílů bez dodatečného opracování

**8.2.1** Zpracovávaný kus musí být možno umístit do montážního celku (svařence). Jmenovitý rozměr uříznutého dílu je dán jmenovitým rozměrem dokončeného dílu (výkresovým rozměrem), který je zmenšen o mezní úchytku (viz obrázek 14). Skutečný rozměr dílu, vyrobeného tepelným dělením vždy odpovídá největšímu rozměru u vnějších rozměrů a nejmenšímu rozměru u vnitřních rozměrů.

**POZNÁMKA** Tento druh tolerancí je běžně požadován při přípravě svarového spoje, protože zpracovávaný kus musí být možno umístit do montážního celku (svařence).



kde:

A je jmenovitý rozměr dokončeného dílu;

B jmenovitý rozměr uříznutého dílu;

G<sub>u</sub> horní mezní úchytky;

G<sub>v</sub> dolní mezní úchytky.

Obrázek 14 – Rozměrové úchytky dílů bez dodatečného opracování